

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií**

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy

**Experimentální studie proudění v ejektorové  
komoře metodou PIV**

**Experimental study of the flow in the ejector  
chamber using PIV method**

**Bakalářská práce**

Autor:	<b>Tomáš Louč</b>
Vedoucí práce:	Ing. Michal Kotek, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Darina Jašíková, Ph.D.

**V Liberci dne 18. 5. 2012**

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš Louč**  
Osobní číslo: **M09000072**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektronické informační a řídicí systémy**  
Název tématu: **Experimentální studie proudění v ejektorové komoře metodou PIV**  
Zadávající katedra: **Ústav řízení systémů a spolehlivosti**

Z á s a d y   p r o   v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s problematikou ejektorového jevu a zařízení pracujících na tomto principu.
2. Zvažte možnosti bezkontaktního měření proudění v uzavřené ejektorové komoře.
3. Navrhněte uspořádání měření proudění v ejektorové komoře metodou PIV.
4. Navrhněte postup pro zpracování a zpracujte obrazová PIV data.
5. Ze statistiky zpracovaných dat vyhodnoťte a prezentujte chování proudění v ejektorové komoře.
6. Proveďte zhodnocení možností měřicího systému a navrhněte možná doporučení pro budoucí podobné experimenty.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Rozsah pracovní zprávy: **cca 40 stran**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná / elektronická**  
Seznam odborné literatury:

1. **Kopecký, V.: Laserová anemometrie v mechanice tekutin (Laser Anemometry in Fluid Mechanics), 204 pages, February 2008, Ed. TRIBUN EU s.r.o., Brno, ISBN 978-80-7399-357-3**
2. **Dvořák, V.: Výzkum a optimalizace proudění v ejektorech, habilitační práce, 2010, Liberec**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Michal Kotek, Ph.D.**  
Ústav řízení systémů a spolehlivosti  
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Darina Jašíková**  
Ústav řízení systémů a spolehlivosti

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2011**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **18. května 2012**

prof. Ing. Václav Kopecký, CSc.  
děkan

doc. Ing. Libor Tůma, CSc.  
vedoucí ústavu

V Liberci dne 14. října 2011

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum

Podpis

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval konzultantce bakalářské práce Ing. Darině Jašíkové, Ph.D. a zejména vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Michalu Kotkovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a veškerý čas, který mi věnovali při řešení dané problematiky této práce.

Tato bakalářská práce vznikla za podpory projektu Reflexe požadavků průmyslu na výuku v oblasti automatického řízení a měření.

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá zpracováním a vyhodnocením naměřených dat ejektorového proudění, která byla naměřena metodou PIV. V rešeršní části práce je nejprve popisován ejektorový jev, dále pak důvod výběru a problematika PIV metody. V praktické části jsou popisovány použité metody pro zpracování dat a závěrečné vyhodnocení dosažených výsledků. Na závěr jsou uvedeny možné přínosy této práce a doporučení pro podobné budoucí experimenty. V příloze se nachází MATLAB skript použitý při spojování vektorových map.

## **Klíčová slova**

Dynamic Studio, ejektor, PIV, proudění

## **Abstract**

This work is focused on the processing and evaluation of measured data of ejector flow which were measured using PIV method. In the research of work is first described ejector effect, then reason for selecting PIV method and issue PIV method. In the practical part are described methods used for data processing and final evaluation of results. At the end are mentioned possible benefits of this work and recommendations for similar future experiments. In the attachment is the MATLAB script used for connecting vector maps.

## **Key words**

Dynamic Studio, ejector, flow, PIV

# Obsah

<b>Prohlášení .....</b>	<b>3</b>
<b>Poděkování .....</b>	<b>4</b>
<b>Abstrakt .....</b>	<b>5</b>
<b>Obsah .....</b>	<b>6</b>
<b>1. Úvod .....</b>	<b>8</b>
<b>2. Popis ejektorového jevu a využití ejektorů .....</b>	<b>9</b>
2.1 Princip činnosti ejektoru.....	9
2.2 Výhody a nevýhody ejektorů.....	9
2.3 Použití ejektorů .....	10
<b>3. Metody pro měření proudění v ejektorech .....</b>	<b>13</b>
3.1 Kontaktní metody.....	13
3.2 Bezkontaktní metody.....	15
<b>4. PIV – Particle Image Velocimetry .....</b>	<b>17</b>
4.1 Principy a záznam obrazů metody PIV .....	17
4.2 Analýza PIV obrazů .....	19
4.2.1 Korelační funkce .....	20
4.2.2 Algoritmus numerického zpracování PIV obrazů.....	22
4.3 Metody numerického zpracování PIV dat .....	23
4.3.1 Překrývání vyhodnocovaných oblastí .....	23
4.3.2 Subpixelová interpolace .....	24
4.4 Validační funkce .....	24
4.4.1 Range validace .....	24
4.4.2 Moving average .....	25
4.5 Systematické chyby a omezení metody PIV .....	25
4.5.1 Ztracené páry .....	25
4.5.2 Hustota sycení částicemi .....	26

4.5.3	Dynamický rozsah.....	26
4.5.4	Posunutí druhého obrazu .....	27
4.5.5	Adaptivní korelace .....	27
4.5.6	Rychlostní gradienty ve vyhodnocované oblasti .....	27
<b>5.</b>	<b>Experimentální uspořádání pro měření proudění v ejektoru PIV metodou ...</b>	<b>29</b>
5.1	Popis měření proudění v ejektoru PIV metodou.....	31
<b>6.</b>	<b>Postup zpracování naměřených dat .....</b>	<b>34</b>
6.1	Zpracování obrazového záznamu.....	34
6.2	Výpočtové metody .....	36
6.3	Statistické zpracování výsledků .....	37
6.4	Spojení vektorových map .....	39
<b>7.</b>	<b>Vyhodnocení dat .....</b>	<b>41</b>
	<b>Závěr.....</b>	<b>45</b>
	<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>47</b>
	<b>Příloha A.....</b>	<b>49</b>



# 1. Úvod

Bakalářská práce se zabývá zpracováním a vyhodnocením naměřených obrazových PIV dat ejektorového proudění. Měření bylo provedeno metodou PIV v Laboratoři laserové anemometrie na Technické univerzitě v Liberci (TUL) týmem pracovníků z Fakulty mechatroniky, informatiky a mezioborových studií (FM) a Katedry energetických zařízení (KEZ) na Fakultě strojní (FS) při použití různých trysek a režimů proudění. Práce řeší celkový vliv jednotlivých trysek a režimů proudění na vývoj proudění a proces směšování v ejektorové komoře.

Z důvodu měření ejektorového proudění metodou PIV se nachází v první části práce seznámení a obecný úvod k ejektorům, jejich princip činnosti, praktická použití, výhody a nevýhody.

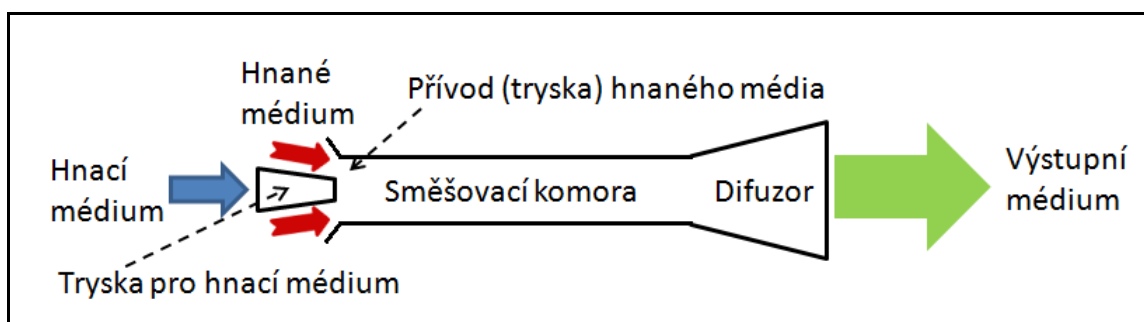
V další části jsou porovnávány výhody a nevýhody metody PIV oproti třem dalším metodám měření proudění. A to jak bezkontaktním, tak i kontaktním metodám. Pro správné pochopení principu metody PIV, způsobu záznamu a analýzy PIV obrazů je v dalších kapitolách této práce sepsána rešerše o PIV metodě. Nechybí ani popis možných chyb a omezení, které tato metoda přináší.

Pro teoretickou část bakalářské práce byla použita zejména doporučená literatura. Jedná se o publikaci s názvem Laserová anemometrie v mechanice tekutin [8] od pana prof. Ing. Kopeckého Václava, CSc., zabývající se mimo jiné také metodou PIV. A dále o habilitační práci pana doc. Ing. Dvořáka Václava, Ph.D. s názvem Výzkum a optimalizace proudění v ejektorech [4].

V praktické části práce jsou popisována možná experimentální uspořádání měřicích zařízení, jež mohla být zvolena pro měření a které z nich bylo použito jako nejvhodnější a zároveň dostupné. Praktická část dále popisuje měření PIV dat, jejich zpracování s využitím programu Dynamic Studio a vysvětluje metody aplikované pro dosažení konečných výsledků. V příloze na konci práce se nachází skript napsaný v programu MATLAB, sloužící k sesazení výsledných vektorových map a vytvoření celkového pohledu na proudění v celé ejektorové komoře. Na závěr je provedeno zhodnocení konečných zpracovaných dat, jsou uvedena možná doporučení pro další podobné experimenty a přínosy této práce.

## 2. Popis ejektorového jevu a využití ejektorů

Ejektor je proudové čerpadlo, které pomocí hnacího média (kapaliny, plynu) pod vysokým tlakem a s velkou rychlostí strhává a nasává okolní hnané médium. Hnané médium má tlak a rychlost menší, než je tlak a rychlost hnacího média. Konstrukci ejektoru lze vidět na obr. 1. Většinou se ejektor skládá z trysky pro hnací médium, z trysky pro hnané médium, jež je potřeba nasát, směšovací komory a difuzoru. [2, 4]



Obr. 1: Konstrukce ejektoru [4]

### 2.1 Princip činnosti ejektoru

Princip činnosti je založen na podtlaku, který vznikne ve směšovací komoře pomocí hnacího média, které proudí pod vysokým tlakem a rychlostí. Tento podtlak má za následek nasávání hnaného média. Výsledné médium získané ve směšovací komoře má tlak větší než je tlak hnaného média a zároveň menší než je tlak hnacího média. Také dochází k vyrovnání velikostí vektorů rychlosti v celém profilu směšovací komory. Jen u stěny směšovací komory je rychlost média vlivem tření a víření menší. Dále vstupuje smíšené médium do difuzoru, kde se část kinetické energie mění zpět na tlakovou energii, čímž dochází ke zvýšení tlaku výsledného média a zvyšuje se tak účinnost ejektoru. [2, 4]

### 2.2 Výhody a nevýhody ejektorů

Výhodou ejektorů je jednoduchá konstrukce, protože se obejdou bez pohyblivých částí. Tím je dosaženo i nízké výrobní ceny. Díky jednoduché konstrukci mohou být ejektory vyráběny z odlišných materiálů pro média s různou kyselostí či zásaditostí (pH – potenciálem vodíku). Ejektory ke své činnosti nepotřebují elektrickou energii. Elektrická energie se využívá pouze k pohonu kompresoru pro pohyb hnacího média.

Největší nevýhodou ejektorů je nízká účinnost, která nabývá hodnot kolem 30 %, ale většinou ještě méně. Je způsobena zejména při směšování médií ve směšovací komoře, třením a vířením. Nízká účinnost pak vede k omezenému použití ejektorů. Proto se ejektory používají zejména tam, kde je hnacího média dostatek, jelikož se médium využívá hlavně pro jiné účely.

[2, 4]

## **2.3 Použití ejektorů**

Ejektory jsou zařízení, která lze využít k různým účelům, z nichž některé jsou uvedeny dále.

### **Požární ejektory**

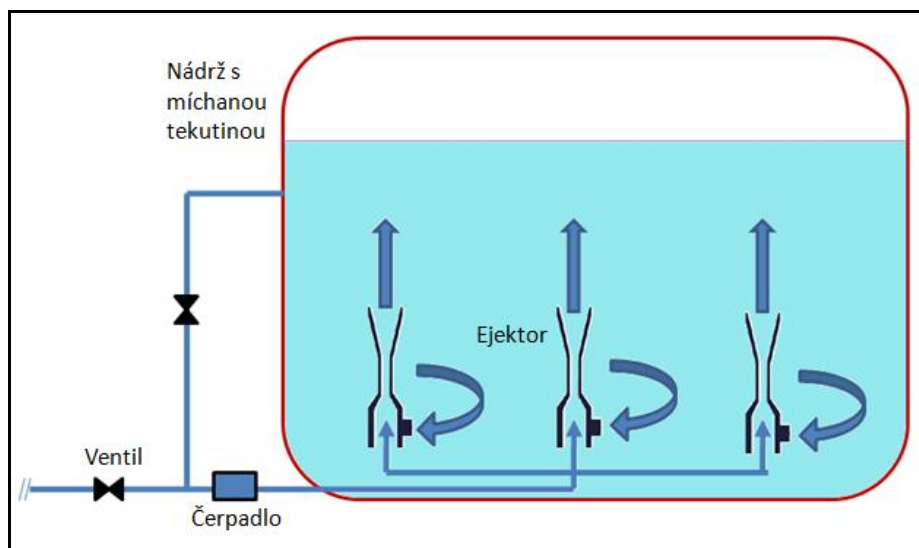
Požární ejektory se používají pro čerpání vody z větších hloubek, než je nejvyšší možná sací výška čerpadel. Jako hnací médium se pro tyto ejektory dodává pod tlakem voda z hydrantů nebo hasičských stříkaček (čerpadel). [2]

### **Přečerpávání nádrží**

Využívá se, pokud je potřeba přečerpát tekutinu z jedné nádrže do druhé. Nádrže jsou propojeny a ejektor je připojen k nádrži, do které je potřeba přečerpát tekutinu z jiné nádrže. Po přivedení hnacího média do ejektoru je docíleno přečerpání tekutiny. Toto se využívá například u tankerů, pokud dojde k havárii a je nutné odčerpat palivo z nádrží tankeru. [2]

### **Míchání tekutin v nádrži**

Pomocí čerpadla je přes ejektory, umístěné u dna nádrže, načerpáno do nádrže médium (např. olej), které bude poté mícháno. Pokud je nádrž plná, uzavře se přívod pro čerpání média a čerpadlo dále čerpá médium už z horní části nádrže do ejektorů vespod nádrže. Pro ně je toto čerpané médium jako hnací a díky ejektorům je nasáváno médium vespod nádrže a dochází k promíchávání média v celém objemu nádrže. Princip je naznačen na obr. 2. [2]



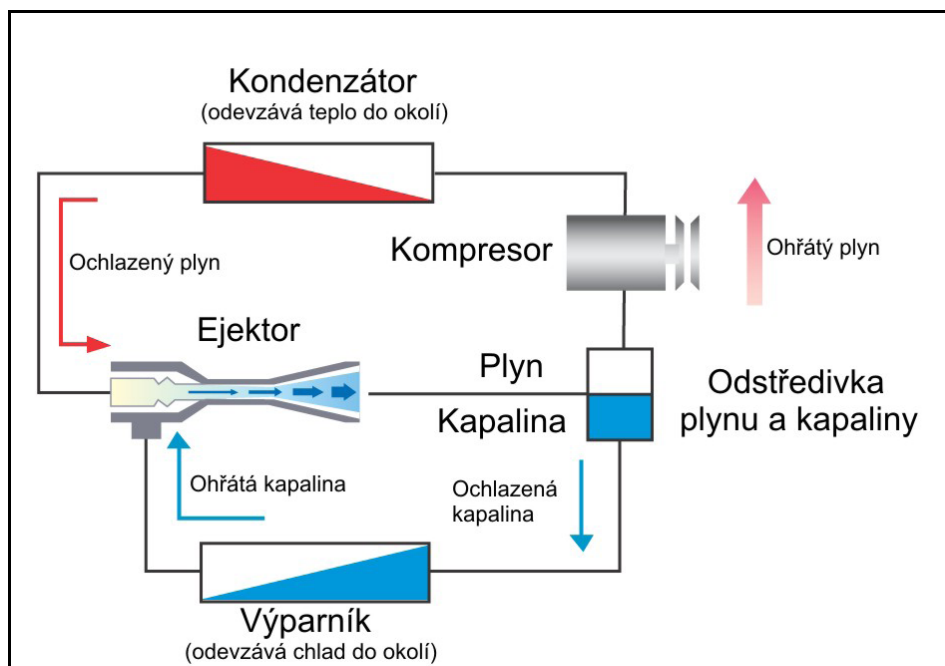
Obr. 2: Princip míchání tekutiny v nádrži [2]

### Kalová čerpadla využívající ejektoru

Využití tohoto čerpadla (ejektoru) nastává, pokud se hlavní čerpadlo umístěné na dně jámy ucpe, nastane výpadek elektřiny nebo jinak selže jeho funkce a přestane čerpat znečištěnou vodu. Následně dojde ke stoupání hladiny vody v jámě. Při určité úrovni hladiny se aktivuje plovákový spínač a otevře se ventil pro vstup hnacího média do ejektoru, který začne ihned odčerpávat vodu v jámě. [2]

### Ejektorový chladicí systém

Tento systém se využívá např. u ledniček. Výparník je umístěn uvnitř ledničky, naopak kondenzátor venku. Kompresor nasaje okolní vzduch a přenese ho do kondenzátoru, který odevzdá teplo do okolí. Tím je získán ochlazený vzduch, jenž vstupuje do ejektoru jako hnací médium a nasává s sebou ohřátou kapalinu z výparníku. Směs vzduchu a kapaliny putuje přes směšovací komoru a difuzor ejektoru do odstředivky. Zde se od sebe smíšené médium oddělí a vzniká ochlazená kapalina a teplý vzduch. Ochlazená kapalina putuje do výparníku, ten odevzdá chlad do ledničky. Ohřátá kapalina putuje opět do ejektoru. Teplý vzduch je vtahován do kompresoru a dále se přenáší do kondenzátoru a celý proces se podle obr. 3 opakuje. [2]



Obr. 3: Princip funkce ejektorového chladičho systému [2]

### 3. Metody pro měření proudění v ejektorech

Cílem měření proudění je zjistit určitým způsobem pohyb proudícího média. Každá metoda měření má své výhody, ale také nevýhody, podle nichž lze danou metodu zvolit. Jedno ze základních dělení metod pro měření proudění je na kontaktní a bezkontaktní metody. V případě bezkontaktních metod je využíváno především laserové anemometrie, která je přesná díky spojení s počítačovou technikou a umožňuje měřit při různých rychlostech, teplotách a tlaku média. Naopak kontaktní metody mají jednoduchou konstrukci pro měření a zpracování měřených dat není tak náročné.

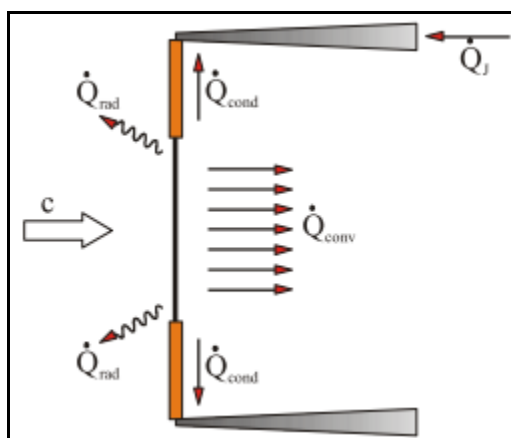
#### 3.1 Kontaktní metody

##### Drátkové anemometry

Princip je založen na přenosu tepla z drátku (nejčastěji wolframového), upnutého mezi hroty vidlice, do proudícího média. Drátkem prochází elektrický proud, tím se drátek ohřívá a vytvořené teplo se přenáší do proudícího média. Toto přenášené teplo je úměrné rychlosti proudícího média a také rozdílu teplot drátku a tekutiny. [4]

Výhody této metody jsou, jak uvádí [12], malý měřicí bod (u jednoho senzoru  $1 \times 0,005 \text{ mm}^2$ ), vysoká citlivost, vysoká přesnost, která je dána kalibrací a podmínkami při měření, vysoké frekvence až 400 kHz, velký rozsah rychlostí (u vzduchu od 0,01 m/s – 1700 m/s), citlivost na další fyzikální veličiny (např. teplotu, tlak) a relativně nízká cena.

Naopak za nevýhody uváděné v [12] lze považovat, že sonda je v kontaktu s proudícím médiem, je křehká, citlivá na znečištění média a také na další fyzikální veličiny jako je tlak a teplota. Také není možné indikovat směr proudění.



Obr. 4: Přenos tepla ze žhaveného drátku [4]

Obr. 4 znázorňuje přenos tepla ze žhaveného drátku upnutého mezi hroty vidlice.  $\dot{Q}_{rad}$  označuje teplo vyzařené do okolí,  $\dot{Q}_{cond}$  teplo odvedené do vidlice,  $\dot{Q}_{conv}$  teplo předané do proudícího média a součet těchto tří složek tepla je roven  $\dot{Q}_J$ . Písmeno  $c$  pak označuje rychlost proudícího média. [4]

### Pitotova trubice

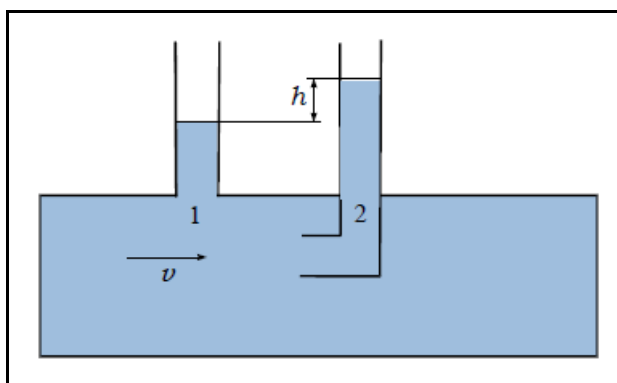
Princip Pitotovy trubice je založen na rozdílu tlaků. Na obr. 5 je zobrazena Pitotova trubice natočená proti směru proudění tekutiny. V bodě číslo jedna má tekutina rychlost odpovídající rychlosti proudění tekutiny. V bodě číslo dva, kde je trubice zahnutá, ztrácí tekutina veškerou svoji rychlost. [11]

Jelikož platí zákon zachování energie pro proudící tekutinu v potrubí (Bernoulliho rovnice), platí vztah [11]:

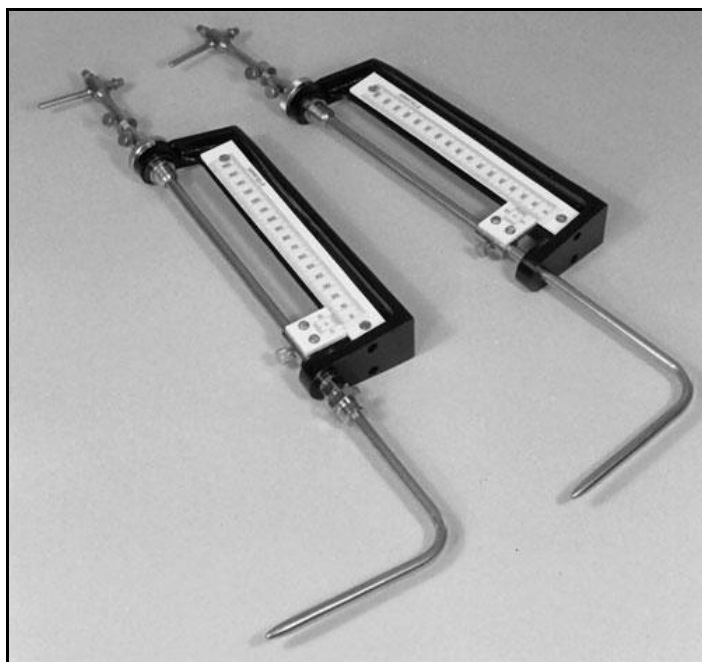
$$v = \sqrt{\frac{2(p_2 - p_1)}{\rho}} = \sqrt{\frac{2\rho h g}{\rho}}, \quad (1)$$

kde  $p_1$  a  $p_2$  jsou tlaky v bodech 1 a 2 (viz obr. 5),  $\rho$  je hustota proudící tekutiny,  $g$  je gravitační zrychlení,  $h$  je rozdíl úrovně hladin a  $v$  je výsledná rychlost proudění.

Výhodou Pitotovy trubice je její jednoduchá konstrukce. Nevýhodou však je kontakt s médiem a ovlivnění jeho proudění, možné zanesení trubice a tím nepřesné měření. Pitotova trubice také neumožňuje měřit celý profil proudícího média, ale pouze určitou bodovou oblast.



Obr. 5: Pitotova trubice [11]



*Obr. 6: Fotografie Pitotovy trubice pro měření rychlosti proudění vody [1]*

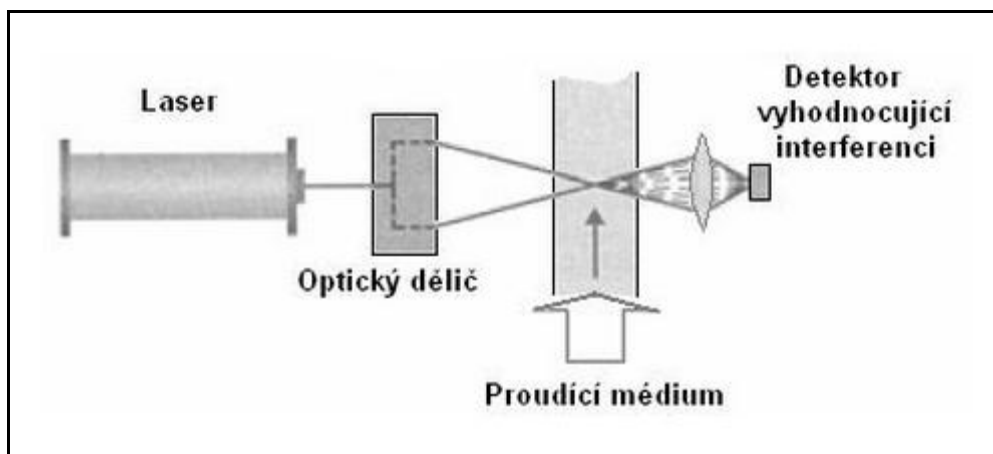
## **3.2 Bezkontaktní metody**

### **LDA – Laser Doppler Anemometry**

Médium, jehož rychlost proudění je potřeba změřit, je syceno stopovacímí částicemi (např. olejovými). Laser vyzáří laserový paprsek a ten je opticky rozdělen na dva koherentní paprsky. Při interakci paprsků se sycícími částicemi unášených proudem média dochází k rozptylu světla v místě, kde paprsky interferují. Na základě Dopplerova jevu dochází k posunu frekvence rozptýleného světla na pohybující částici vůči stojícímu detektoru. V číslicových a frekvenčních analyzátorech lze určit dopplerovskou frekvenci a z ní vyvodit rychlost pohybujících částic. [14]

Výhodou této metody je, že neovlivňuje proudění, jelikož se jedná o bezkontaktní metodu. Dalšími výhodami jsou vysoká přesnost, absolutní metoda měření (není nutná kalibrace) a vysoké prostorové rozlišení (malý měřicí objem). Nevýhodou je bodové měření, nikoliv měření celého profilu proudícího média, a nutnost sycících částic. [13]





*Obr. 7: Princip Dopplerova laserového anemometru [10]*

### **PIV – Particle Image Velocimetry**

Jedná se o moderní metodu pro zkoumání nestacionárních proudových polí, která se vyskytují i v ejektorovém proudění. Zejména pro svoje výhody, jako je měření celého profilu proudícího média, bezkontaktní metoda, vysoká přesnost, byla tato metoda zvolena hlavní experimentální metodou při řešení této práce. Nevýhodou je drahé vybavení, velké objemy zpracovávaných dat a tím i dlouhé vyhodnocování dat, nutnost průhledného potrubí v místě měření a také potřeba sytících částic. Podrobný popis této metody je popsán v kapitole 4.

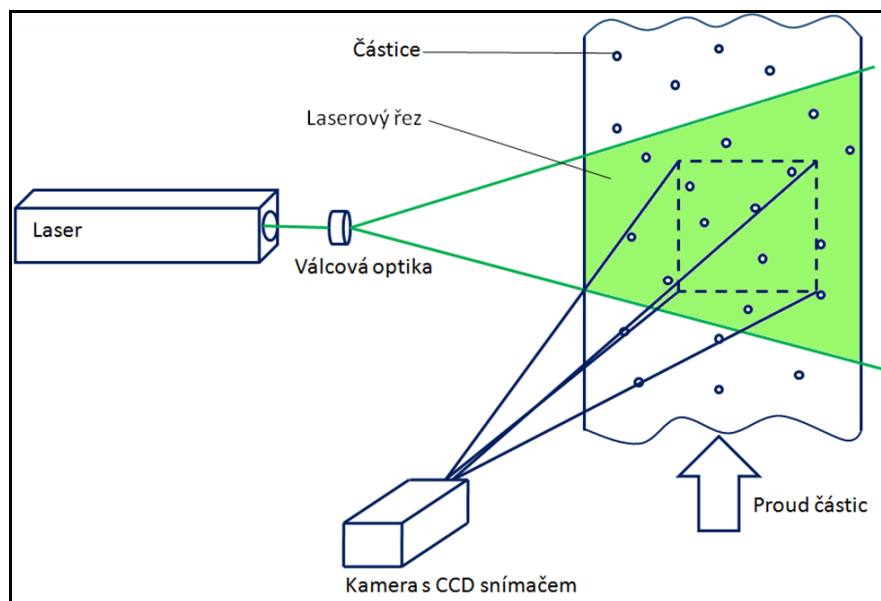
## 4. PIV – Particle Image Velocimetry

Tato metoda má název z anglického Particle Image Velocimetry (měření rychlosti obrazu částice nebo také integrální laserová anemometrie). Jedná se o měřicí metodu využívanou v oboru mechaniky tekutin. Tuto metodu lze použít pro měření stacionárního i nestacionárního proudění, laminárního i turbulentního proudění. Výsledkem jsou informace o okamžitém rozložení rychlostí v dvourozměrném poli proudící tekutiny. [8]

### 4.1 Principy a záznam obrazů metody PIV

Princip měření rychlosti proudící tekutiny je založen na změření posunu sytících částic, které jsou unášeny proudem tekutiny, a následném vyhodnocení. Oblast, ve které se sleduje proudové pole a v níž se vyskytují unášené částice, je osvětlena dvěma nebo více po sobě vyzářenými laserovými řezy s konstantním časovým odstupem. Tato oblast a pohyb částic v ní je pak zaznamenán na CCD (Charge-Coupled Device) čip kamery citlivý na světlo. Rychlost lze pak vypočítat jako podíl vzdálenosti, kterou částice urazily, a konstantního času mezi jednotlivými laserovými pulzy. [8]

Jak je patrné z obr. 8, laserový impulz vyzářený z laseru je pomocí válcové optiky přeměněn na laserový řez. Laserový impulz musí trvat co nejkratší dobu, aby měření bylo co nejpresnější a zaznamenala se přesná poloha částic v definovaný čas. Vytvořený řez osvětluje měřenou oblast proudícího pole s unášenými částicemi. K snímání pohybu částic slouží kamera, která je umístěna kolmo k laserovému řezu a zaznamenává odraz laserového světla od částic na svůj CCD čip. Částice jsou pak ve snímku zobrazeny bíle a pozadí je černé. Pro vyhodnocení je nutné pořídít minimálně dva snímky velmi rychle za sebou. Na prvním snímku je počáteční poloha částic a na druhém koncová poloha částic, z toho je možné zjistit vektor posunutí a následně rychlost pohybu částic. [8]



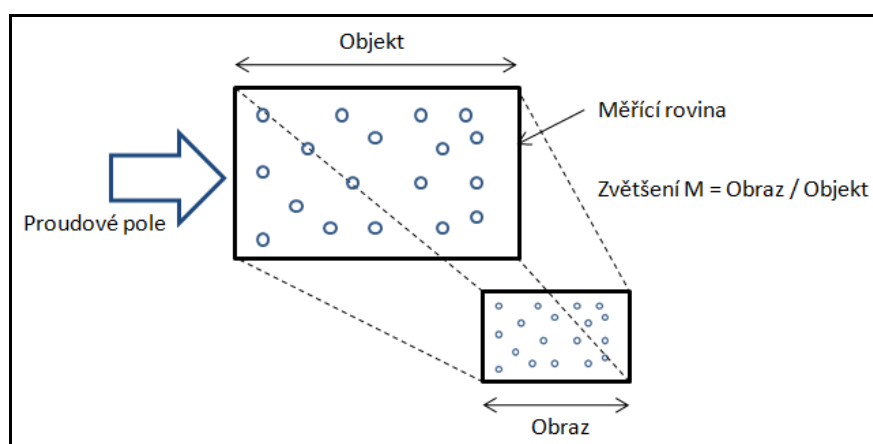
Obr. 8: Princip měření PIV metodou [8]

Jsou možné dva způsoby záznamu obrazu PIV metodou:

- 1) Dvojnásobná expozice – první i druhý snímek s polohou částic v laserovém řezu je zaznamenán do jednoho obrazu. V jednom obraze je tak zachycena jak počáteční, tak koncová poloha částic.
- 2) Jednotlivé expozice – první a druhý snímek s polohou částic v laserovém řezu jsou zaznamenány do obrazů samostatně každý zvlášť, proto je pak v prvním obraze zachycena počáteční a v druhém obraze koncová poloha částic.

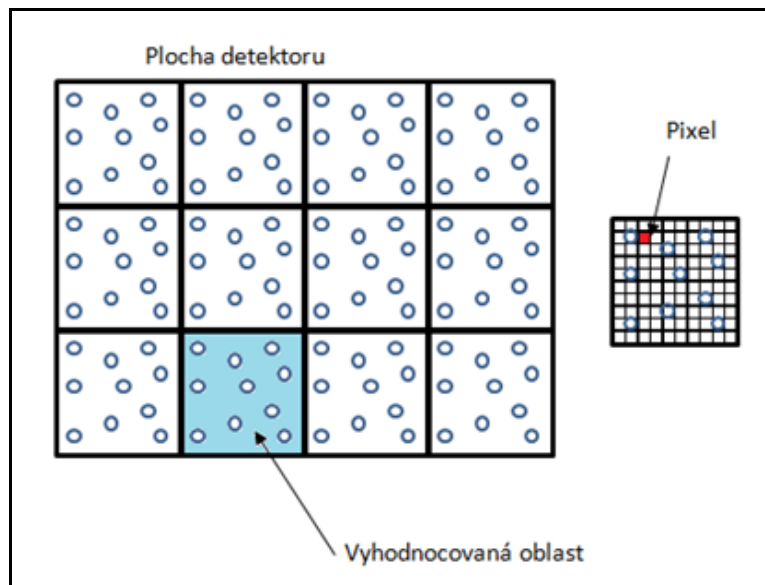
[8]

Obr. 9 zobrazuje optický záznam PIV obrazu kamerou. Objektová rovina snímaná kamerou je promítnuta do obrazové roviny CCD čipu kamery. Poměr *obraz / objekt* pak udává zvětšení  $M$ . [8]



Obr. 9: Optický záznam PIV obrazu [8]

Oblast snímaná kamerou se rozděluje na tzv. vyhodnocované oblasti (obr. 10), které jsou čtvercové. Pomocí analýzy PIV obrazů se zjistí průměrný posun částic uvnitř všech vyhodnocovaných oblastí. Každou vyhodnocovanou oblast pak reprezentuje jeden vektor rychlosti. [8]



Obr. 10: Vyhodnocované oblasti [8]

## 4.2 Analýza PIV obrazů

Při analýze PIV obrazů je nutné mít v každé vyhodnocované oblasti zaznamenaný určitý počet částic pro správné a přesné určení vektoru rychlosti každé oblasti. Proto je potřeba zvolit správné sycení proudu tekutiny k získání té správné koncentrace částic. [8]

Lze rozlišit tři druhy sycení:

### 1) Slabé sycení proudu

Koncentrace sytících částic je tak malá, že výskyt více jak jedné částice v každé vyhodnocované oblasti a ve stejný čas je minimální. Zpracování PIV obrazu pak závisí na určení vzdálenosti středů této jedné částice mezi počáteční a koncovou polohou. Toto sycení není však moc vhodné. Není možné zajistit, aby při každém záznamu obrazu byla v každé vyhodnocované oblasti právě jedna částice. Může se stát, že bude částice chybět nebo naopak přebývat. [8]

## 2) Střední syčení proudu

Koncentrace je dost vysoká na to, aby v každé vyhodnocované oblasti byly obrazy částic a tím byla zajištěna plynulost rychlostní informace v celé měřené rovině. [8]

## 3) Silné syčení proudu

Koncentrace syčení je tak velká, že optika není schopna rozlišit jednotlivé částice. To ve výsledku vede k tvoření skvrn v PIV obraze. Skvrny jsou tvořeny právě velkým množstvím sytících částic. [8]

### 4.2.1 Korelační funkce

Pro určení průměrného posunutí obrazů částic se používá korelace. K numerickému výpočtu korelací je potřeba provést digitalizaci PIV obrazu. Digitalizace je u PIV záznamu prováděna automaticky jednotlivými pixely CCD maticového snímáče. Podle způsobu záznamu obrazu PIV se používá daný typ korelace. Pro určení průměrného posunutí částic ve vyhodnocované oblasti u metody dvojnásobné expozice je vhodná autokorelace. Naopak u metody jednotlivých expozic se používá vzájemná korelace. [8]

Funkce popisující diskretní vzájemnou korelaci je popsána rovnicí [8]:

$$\phi_{fg}(m,n) = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} \sum_{l=-\infty}^{l=\infty} f(k,l) \cdot g(k+m, l+n). \quad (2)$$

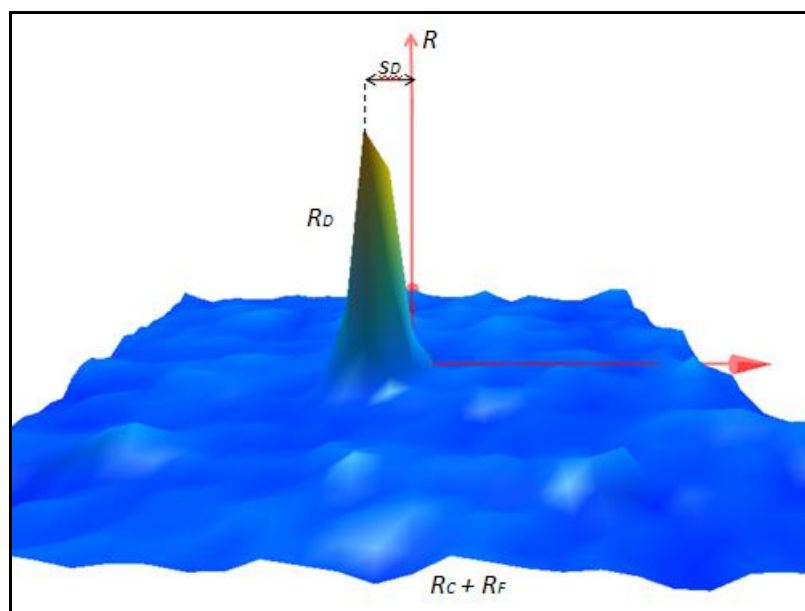
Funkce popisující diskretní autokorelaci je dána touto rovnicí [8]:

$$\phi_{ff}(m,n) = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} \sum_{l=-\infty}^{l=\infty} f(k,l) \cdot f(k+m, l+n). \quad (3)$$

Symboly  $(k,l)$  ve funkcích (2) a (3) označují souřadnice v obrazové rovině měřené v pixelech. Symboly  $(m,n)$  vyznačují souřadnice v korelační rovině respektive posun sytících částic. Funkce  $f(k,l)$  vyjadřuje světelnou intenzitu ve vyhodnocované oblasti zaznamenanou v čase  $t$ . Funkce  $g(k+m, l+n)$  a  $f(k+m, l+n)$  popisují světelnou intenzitu v téže oblasti v čase  $t + \Delta t$ . Kde za čas  $\Delta t$  došlo k posunutí sytících částic o  $m$  a  $n$ .

Obr. 11 zobrazuje výsledek vzájemné korelace ve vyhodnocované oblasti.  $R_D$  znázorňuje maximální vrchol v korelační rovině a jeho poloha odpovídá přímo

průměrnému posunutí částic uvnitř vyhodnocované oblasti, což vyjadřuje vektor  $s_D$ .  $R_C$  s  $R_F$  zobrazují korelační šum. [8]

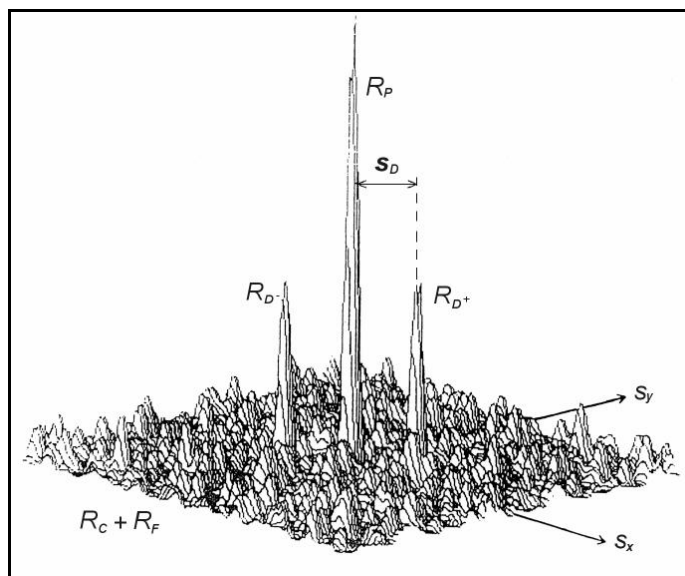


Obr. 11: Výsledek analýzy PIV obrazu v programu Dynamic Studio metodou vzájemné korelace

Obr. 12 zobrazuje výsledek autokorelace ve vyhodnocované oblasti. V tomto případě zde není pouze jeden vrchol  $R_D$ , ale dva. Jeden je označen jako  $R_{D+}$  a druhý jako  $R_{D-}$ . Tyto vrcholy jsou symetricky umístěny vůči střednímu vrcholu  $R_P$ . Průměrné posunutí částic ve vyhodnocované oblasti je pak dáno jako u vzájemné korelace vektorem  $s_D$ , což je spojnice vrcholů  $R_P$  s  $R_{D+}$  nebo  $R_P$  s  $R_{D-}$ . Proto nevýhodou autokorelace je neposkytnutí informace o směru proudění tekutiny. Také vrcholy  $R_{D+}$  a  $R_{D-}$  jsou přibližně poloviční v porovnání se vzájemnou korelací a korelační šum daný součtem členů  $R_C$ ,  $R_F$  je naopak přibližně dvakrát větší.

Z toho vyplývá, že vhodnější metodou pro určení pohybu částic ve vyhodnocovaných oblastech je vzájemná korelace.

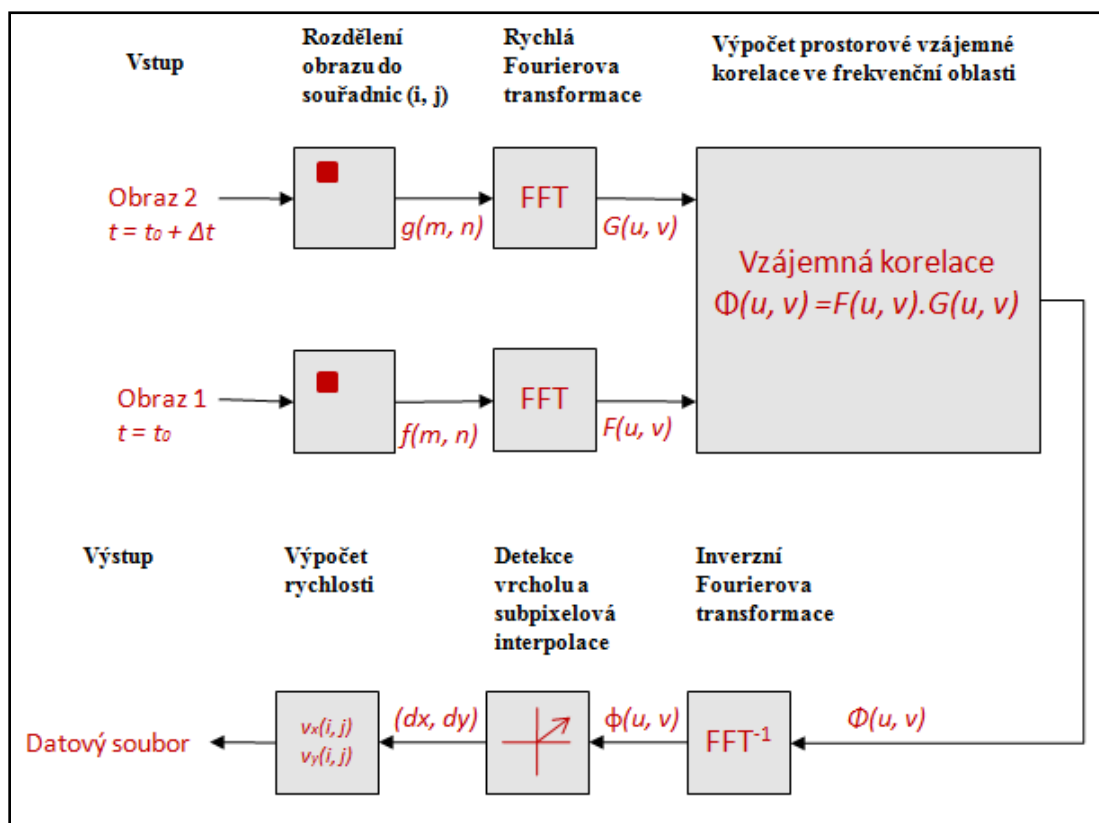
[8]



Obr. 12: Výsledek analýzy PIV obrazu metodou autokorelace [6]

#### 4.2.2 Algoritmus numerického zpracování PIV obrazů

V následujícím obr. 13 je znázorněn algoritmus numerického zpracování PIV záznamu s rychlou Fourierovou transformací (FFT) a vzájemnou korelací. Nejprve jsou načteny dva zaznamenané obrazy (*Obraz 1*, *Obraz 2*), mezi kterými byl časový interval  $\Delta t$ . Podle hloubky obrazových bodů je každému pixelu přidělena hodnota. Na vzniklá obrazová pole je aplikována rychlá Fourierova transformace. Následně je vypočtena vzájemná korelace ze dvou získaných funkcí  $G(u,v)$  a  $F(u,v)$ . Po korelaci se provede inverzní rychlá Fourierova transformace ( $\text{FFT}^{-1}$ ), čímž vznikne korelační rovina s korelačními vrcholy. Dále je vyhledán nevyšší vrchol, případně je provedena subpixelová interpolace (viz [kapitola 4.3.2](#)) pro nalezení přesnější polohy maxima. Takto je získán nejpravděpodobnější vektor posunutí v dané oblasti. A až po vydělení získaného posunutí délkou časového intervalu  $\Delta t$  mezi pořizovanými obrazy a vynásobením rozměrovým měřítkem pixelů je vyjádřena výsledná rychlost. [7]



Obr. 13: Algoritmus zpracování PIV záznamu [8]

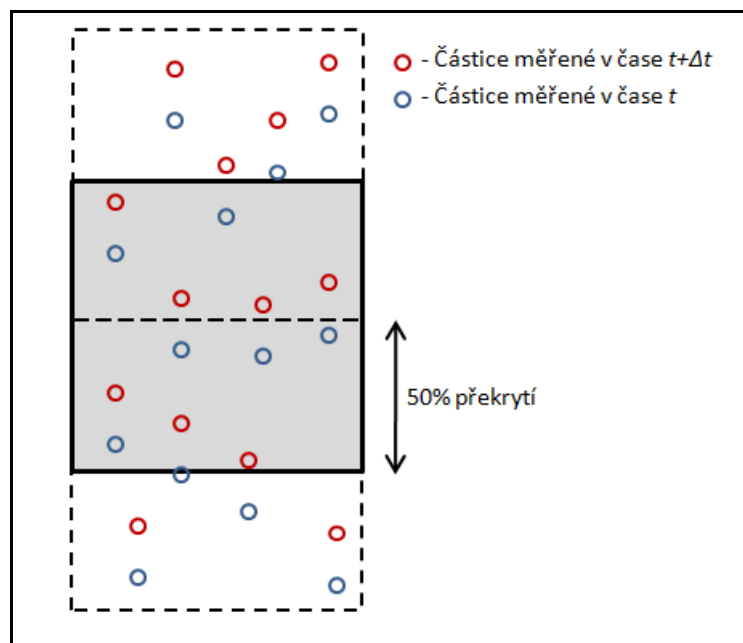
## 4.3 Metody numerického zpracování PIV dat

Pomocí korelačních funkcí se získávají vektorové mapy, ale zároveň může docházet k výpočtovým chybám. Proto je potřeba data ještě zpracovávat, aby tyto chyby byly eliminovány a získaly se tím přesnější výsledky. K tomu slouží následující analyzační metody.

### 4.3.1 Překrývání vyhodnocovaných oblastí

Výhodou překrývání vyhodnocovaných oblastí je omezení „ztracených párů“ (viz kapitola [4.5.1 Ztracené páry](#)). V případě „ztracených párů“ v jedné vyhodnocované oblasti chybí počáteční nebo koncová poloha částice. Tato druhá poloha částice může ležet právě ve vedlejší vyhodnocované oblasti a při výpočtu korelací by docházelo ke zvyšování korelačního šumu. Proto je možné při použití techniky překrývání vyhodnocovaných oblastí tyto „ztracené páry“ omezit, jelikož dojde k překrytí dvou vyhodnocovaných oblastí. Překrývání lze využívat jak ve vertikálním, tak horizontálním směru. Nevýhodou této techniky je prodlužování času potřebného pro výpočet vektorové mapy. [8]





Obr. 14: Technika překrývání vyhodnocovaných oblastí [8]

### 4.3.2 Subpixelová interpolace

Subpixelová interpolace slouží pro přesnější určení polohy, šířky a výšky maximálního vrcholu korelační roviny, který byl nalezen pomocí autokorelace nebo vzájemné korelace. Při subpixelové interpolaci se nejprve hledají souřadnice lokálního maxima, což je poloha pixelu v pixelové matici CCD snímáče. Poloha pixelu je větší nebo rovna než hodnota osmi sousedních pixelů. V dalším kroku se hledají souřadnice vrcholu z tohoto lokálního maxima a dva nejbližší body. [8]

## 4.4 Validační funkce

Validační funkce slouží k potlačení nevhodných vektorů, které byly špatně spočítány např. vlivem ztracených párů nebo vznikly důsledkem špatných podmínek při samotném měření, kdy mohlo dojít k různým odleskům či jiným parazitním vlivům. Existuje několik validačních metod, z nichž jsou dvě dále uvedeny.

### 4.4.1 Range validace

Pro odfiltrování nežádoucích vektorů, které vznikly po korelaci, slouží metoda Range validace. Pomocí této funkce lze odstranit vektory rychlosti podle tří parametrů.

Podle délky vektoru (rychlosti):

*Minimální zvolená rychlost*  $v \leq \|v\| \leq$  *Maximální zvolená rychlost*  $v$ , kde

$$\|v\| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2},$$

podle horizontální složky vektoru:

*Minimální zvolená složka*  $v_x \leq \|v_x\| \leq$  *Maximální zvolená složka*  $v_x$ ,

nebo podle vertikální složky vektoru:

*Minimální zvolená složka*  $v_y \leq \|v_y\| \leq$  *Maximální zvolená složka*  $v_y$ .

[3]

#### 4.4.2 Moving average

Metoda, která spočítá průměrnou hodnotu rychlosti zvolené oblasti o určitém rozměru a poté ji porovná s daným vektorem rychlosti (buňkou) z této oblasti. Pokud se hodnota vektoru rychlosti liší o zvolené procento od hodnoty průměru, nastaví se buňka podle vypočítané průměrné hodnoty okolí nebo se zcela eliminuje.

Průměrnou rychlost  $\bar{v}(x, y)$  zvoleného okolí o rozměrech  $m \times n$  lze spočítat podle vzorce:

$$\bar{v}(x, y) = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=x-\frac{n-1}{2}}^{x+\frac{n-1}{2}} \sum_{j=y-\frac{n-1}{2}}^{y+\frac{n-1}{2}} v(i, j), \quad (4)$$

kde  $x, i$  jsou horizontální složky vektorů rychlosti a  $y, j$  jsou vertikální složky vektorů rychlosti,  $v(i, j)$  jsou rychlosti sousedních vektorů ve zvolené oblasti  $m \times n$ .

[3]

### 4.5 Systematické chyby a omezení metody PIV

Z principu metody PIV a technik dané realizace plynou některé chyby a limity typické pro tuto metodu, na které je potřeba brát ohled při stanovení charakteristik a limitů. [9]

#### 4.5.1 Ztracené páry

Tato systematická chyba vzniká, pokud během časového intervalu mezi pořízením prvního a druhého snímku obraz částice vstoupí nebo vystoupí z jedné vyhodnocované oblasti do jiné. Tím dochází ke ztrátě páru obrazu částic, protože neexistuje počáteční i koncová poloha obrazu částice v jedné vyhodnocované oblasti. Čím vyšší bude rychlost proudícího média se sytícími částicemi, tím je vyšší

pravděpodobnost výskytu „ztracených párů“. Tato chyba vede ke zvyšování korelačního šumu v důsledku náhodných korelací. [8]

### 4.5.2 Hustota syčení částicemi

Chyby způsobené ztracenými páry lze omezit zvýšením hustoty syčení proudu částicemi v každé vyhodnocované oblasti. Tím se zároveň zvýší odstup signálu od šumu. Příliš malé hustoty syčení vedou k chybám, ty pak vedou k výpočtu rychlostí menších než je rychlost skutečná.

Podle počítačové simulace Monte Carlo lze doporučit potřebnou hustotu sytících částic uvnitř vyhodnocovaných oblastí při dodržení maximálního průměrného posunutí pod 1/4 strany těchto oblastí. Pro vzájemnou korelaci je toto minimum 5 částic a pro autokorelaci 10 částic ve vyhodnocované oblasti.

[8]

### 4.5.3 Dynamický rozsah

Dynamický rozsah je jedním ze základních omezení metody PIV. Existují dva typy dynamického rozsahu: absolutní a relativní dynamický rozsah. Absolutní dynamický rozsah je dán rozdílem maximální a minimální měřitelné rychlosti. Relativní dynamický rozsah je dán poměrem maximální a minimální měřitelné rychlosti. Z praxe je známo, že při klasické analýze obvykle nepřekračuje dynamický rozsah hodnotu dvacet. Nicméně hodnota rozsahu lze zvětšit při použití offsetu nebo adaptivní korelace i na padesát. [8]

Absolutní dynamický rozsah je definován vztahem [8]:

$$R_a = |v_{M \max} - v_{M \min}| = \frac{|D_{\max} - D_{\min}|}{M\Delta t}, \quad (5)$$

kde je:

- $v_{M \max}$  vektor maximální měřitelné rychlosti,
- $v_{M \min}$  vektor minimální měřitelné rychlosti,
- $D_{\max}$  vektor maximálního posunutí v obrazové rovině,
- $D_{\min}$  vektor minimálního posunutí v obrazové rovině,
- $M$  zvětšení dané jako  $M = \text{obraz} / \text{objekt}$ ,
- $\Delta t$  časový interval mezi první a druhou expozicí obrazu, tj. časový odstup mezi oběma záznamy.

Relativní dynamický rozsah je definován jako [8]:

$$R_r = \frac{|v|_{\max}}{|v|_{\min}} = \frac{|D|_{\max}}{|D|_{\min}}, \quad (6)$$

kde je:  $|v|_{\max}$  maximální měřitelná velikost rychlosti,  
 $|v|_{\min}$  minimální měřitelná velikost rychlosti,  
 $|D|_{\max}$  maximální měřitelné posunutí v obrazové rovině,  
 $|D|_{\min}$  minimální měřitelné posunutí v obrazové rovině.

#### 4.5.4 Posunutí druhého obrazu

Při běžné korelaci vyhodnocovaných oblastí jsou tyto oblasti umístěny v prvním i druhém PIV obrazu stejně (nejsou posunuty). Maximální měřitelné posunutí částic se pak podle teoretického rozboru, který provedli Keane a Adrian [5], rovná  $\pm 1/4$  délky strany vyhodnocované oblasti. Posunem druhé vyhodnocované oblasti vůči první o definované posunutí (offset) se docílí zvýšení dynamického rozsahu a korelace pak zahrnuje i tento offset. Ideální offset by měl souhlasit s průměrným posunutím částic. Tím lze zmenšit výskyt „ztracených párů“. [8]

#### 4.5.5 Adaptivní korelace

Při použití offsetu, viz předchozí kapitola, je druhá vyhodnocovaná oblast posunuta oproti první o daný offset. Tento offset je pro všechny vyhodnocované oblasti v měřicí rovině stejný.

Při použití adaptivní korelace je využíván adaptivní offset, který je pro každou vyhodnocovanou oblast odlišný. Provádí se mnohonásobné výpočty vzájemné korelace, přičemž při každém dalším výpočtu této korelace se získávají její přesnější výsledky.

Pomocí adaptivního offsetu je docíleno menšího počtu ztracených párů a tím i lepšího odstupu signálu od šumu. Další výhodou je možnost zmenšení vyhodnocovaných oblastí pomocí více průchodů adaptivních korelací. Každý nový průchod adaptivní korelace umožňuje zkrácení stran vyhodnocované oblasti na polovinu, což zvyšuje počet vypočtených vektorů posunutí.

[8]

#### 4.5.6 Rychlostní gradienty ve vyhodnocované oblasti

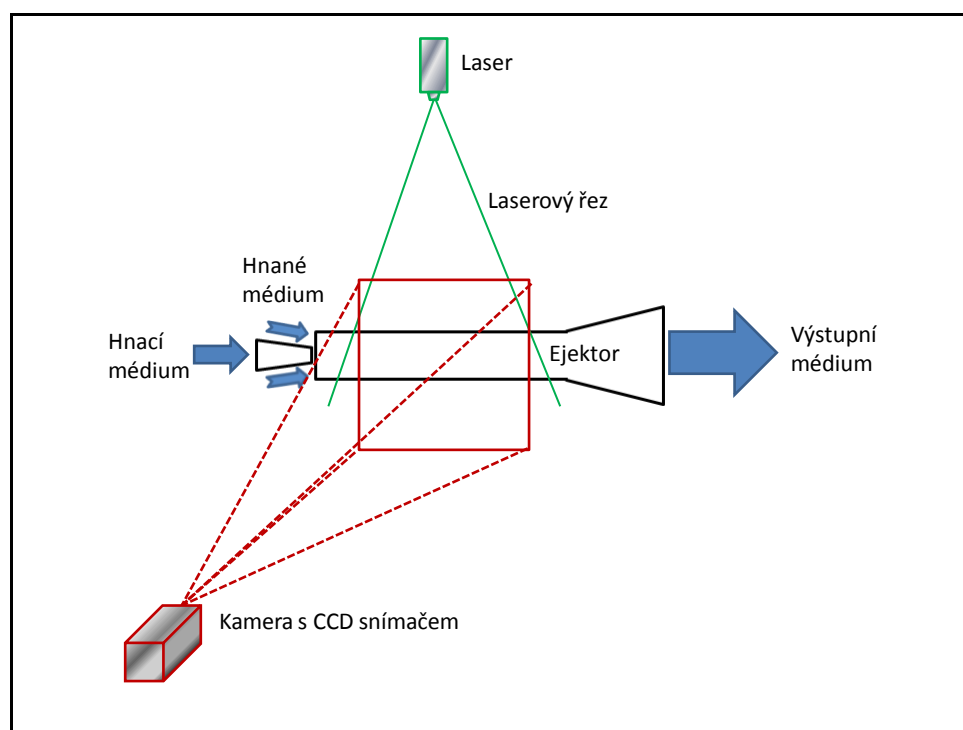
Aby všechny částice měly stejné posunutí, měl by být ideální proud tekutiny v každé vyhodnocované oblasti homogenní. Tento ideální stav však narušují rychlostní

gradients, které snižují odstup signálu od šumu, až může dojít k situaci, kdy správný korelační vrchol je menší než korelační vrcholy šumu kolem. Výsledné vektory mají pak úplně jiný směr než by měl být. Rychlostní gradients dále způsobují, že rychlejší částice budou mít počáteční nebo koncovou polohu mimo vyhodnocovanou oblast, tím narůstá počet ztracených párů. [8]

## 5. Experimentální uspořádání pro měření proudění v ejektoru PIV metodou

Při měření metodou PIV lze libovolně dle prostorových možností nastavovat pozici laseru a kamery od ejektoru a případně posouvat i samotným ejektorem. Díky tomu lze uspořádat měřicí aparaturu tak, aby bylo dosaženo co nejlepších naměřených výsledků. V některých případech však není možné dosáhnout optimálního uspořádání z důvodu menšího prostoru či potřebné techniky. Lze zvolit několik možných uspořádání. Každé má své klady i zápory.

### 1) Pevná pozice laseru, kamery i ejektoru

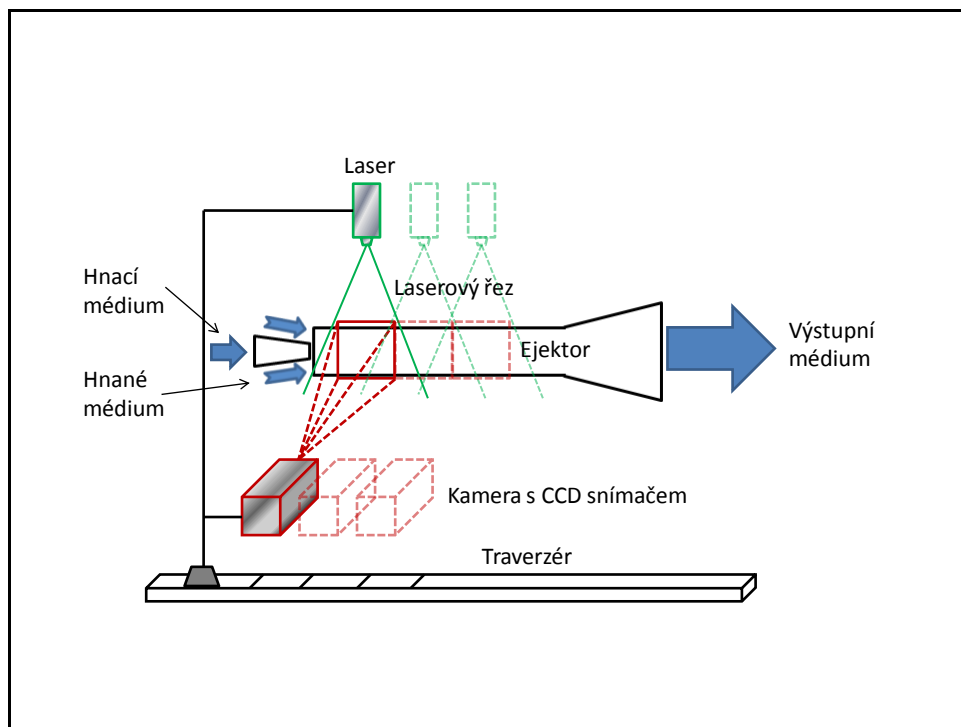


Obr. 15: Experimentální uspořádání s pevnou pozicí laseru, kamery i ejektoru

V tomto případě je pozice kamery, laseru i ejektoru po celou dobu měření stejná. Výhoda tohoto zapojení je, že kamera zabírá celou měřenou oblast najednou a nemusí se tak v průběhu měření s ničím pohybovat (např. s kamerou a laserem). Naopak aby kamera mohla zabírat celou měřenou oblast najednou, která by měla rozměry např. (1,2x1,2) m, musela by být kamera vzdálena přibližně 5 m od ejektoru. Jelikož se při měření používaly sytící částice o průměru 5  $\mu\text{m}$ , nebyly by tyto částice již rozlišitelné. Při rozlišení čipu digitální kamery (1280x1024) pix nelze tedy rozlišovat jednotlivé částice v takto velké oblasti. Také laser by musel být umístěn dále od

ejektoru, aby mohl vytvořit laserový řez pro celou měřenou plochu. Tím by ale docházelo k nízké intenzitě osvětlení oblasti snímané kamerou.

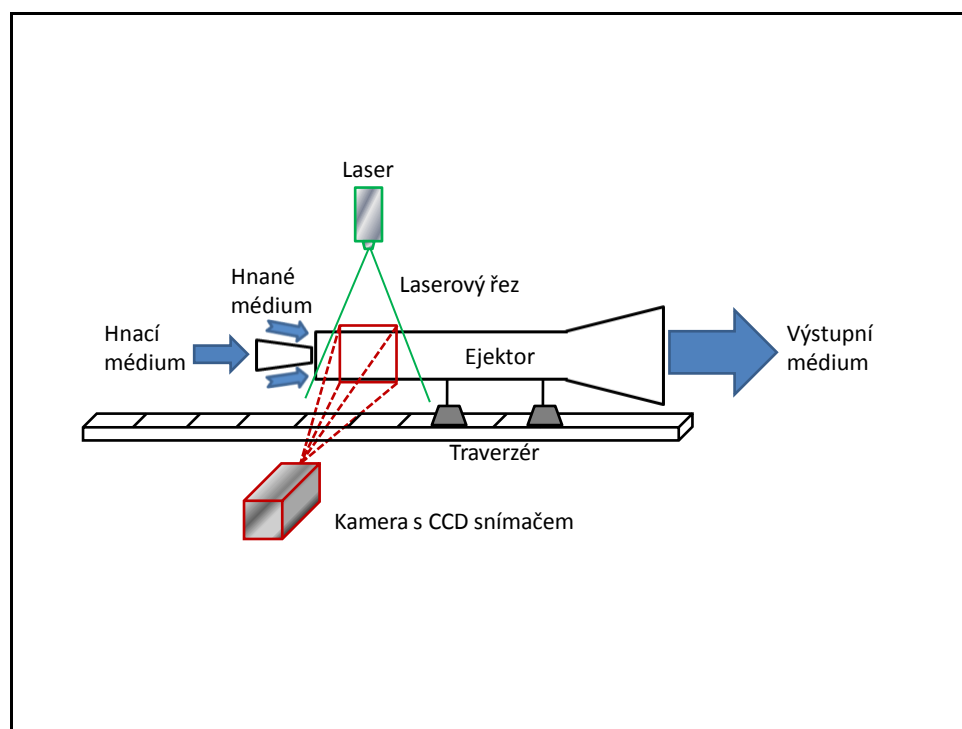
## 2) Pevná pozice ejektoru, pohyblivý laser s kamerou



*Obr. 16: Experimentální uspořádání s pevnou pozicí ejektoru, pohyblivou kamerou a laserem*

Při tomto uspořádání jsou laser a kamera upevněny ke konstrukci, se kterou lze pohybovat po traverzéro, čímž lze zvolit pozici pro měřenou oblast ejektorového proudění. Výhodou je možnost nastavení potřebné vzdálenosti kamery a laseru od ejektoru a tím získaná žádoucí intenzita osvětlení či rozlišení zaznamenaných snímků s částicemi. Nevýhodou však je složitější měření s několika pozicemi. To pak vede k vyšší náročnosti na zpracování dat a také možné nepřesnosti při traverzování systému.

### 3) Pevná pozice laseru s kamerou, pohyblivý ejektor



*Obr. 17: Experimentální uspořádání s pevnou pozicí laseru s kamerou, pohyblivým ejektorem*

Další experimentální možností uspořádání je naopak pohyblivý ejektor upevněný na traverzěru a stabilní laser s kamerou. Výhody jsou stejné jako v předchozím uspořádání s pohyblivým laserem, kamerou a stabilním ejektorem. Nevýhodou je ovšem prostorové omezení, které je při pohybu s delším ejektorem potřeba.

## 5.1 Popis měření proudění v ejektoru PIV metodou

PIV data byla měřena na experimentální aerodynamické trati v Laboratoři laserové anemometrie. K měření rychlosti proudění v ejektorové komoře na této trati byla použita PIV metoda. Bylo zvoleno uspořádání, kdy laser a kamera byly upevněny a jejich pozice byla neměnná. Naopak ejektor byl připevněn k traverzěru, pomocí něhož se nastavovala potřebná měřicí pozice (viz třetí bod kapitoly 5).

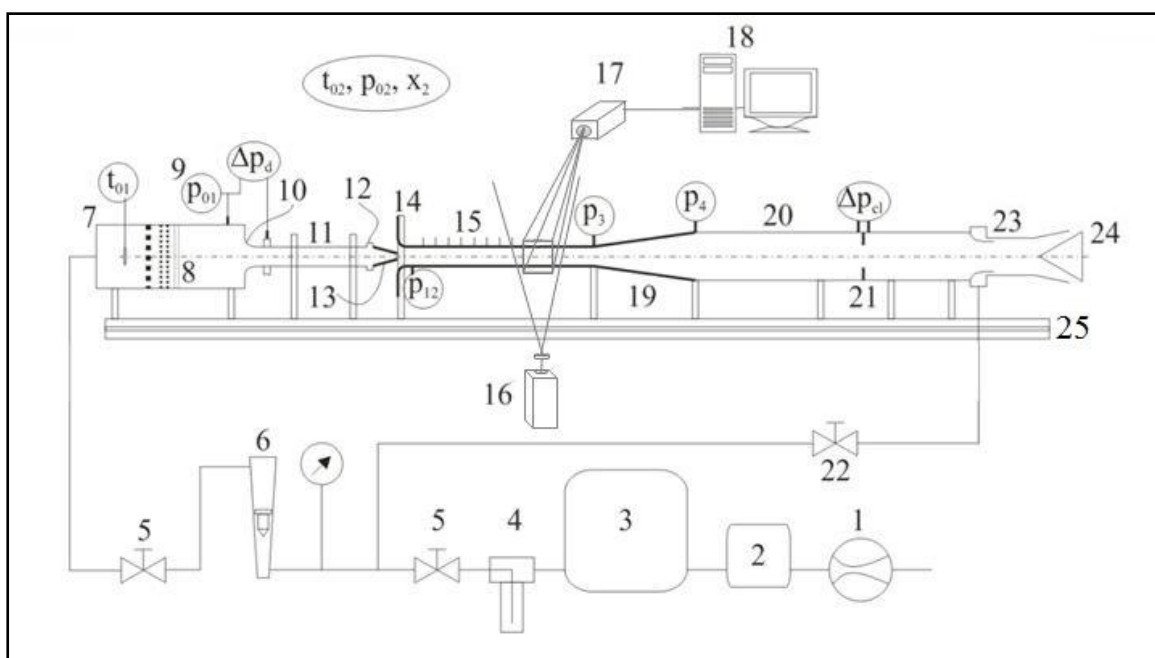
Data se měřila pro tři kruhové trysky s různými průměry. Pro každou trysku byly aplikovány čtyři odlišné režimy proudění s přetlakem hnacího proudu. Pro každý režim bylo nasnímáno sto snímků u jedné měřicí pozice, přičemž k proměření proudění po celé délce směšovací komory ejektoru byly snímány čtyři pozice. Z toho plyne, že při



nasnímání jednoho režimu proudění bylo zaznamenáno 400 PIV obrazů a pro všechny režimy všech tří trysek 4 800 PIV obrazů.

Jedna měřicí oblast (pozice) měla rozměry (9x7) cm a vzdálenost snímací kamery od ejektoru byla přibližně jeden metr. Kamera umožnila snímat v plném rozlišení (1280x1024) pix s počtem 4,5 dvojsnímků za sekundu. Mezi dvojsnímky byl časový interval 1  $\mu$ s. Jako hnací médium byl použit tlakový vzduch hnaný kompresorem a k syčení tohoto tlakového vzduchu byl použit generátor olejových částic.

Na následujícím obrázku je znázorněna aerodynamická trať a její popis, která byla použita při měření proudění v ejektorové komoře pomocí PIV metody. Naměřená data byla pak použita ke zpracování a vyhodnocení v této práci.



Obr. 18: Popis experimentální aerodynamické tratě; 1 - kompresor, 2 – sušička vzduchu, 3 – sestava tlakových zásobníků, 4 – filtry, 5 - redukční ventily, 6 – rotametr, 7 – uklidňovací komora, 8 – uklidňovací síta, 9 - odběr klidového tlaku, 10 – měřicí dýza se snímačem, 11 – přívodní potrubí, 12 - držák hnací trysky, 13 – vyměnitelná hnací tryska, 14 – vstupní část směšovací komory – hnaná tryska, 15 – směšovací komora s odběry statického tlaku, 16 – laser s optikou tvořící laserový řez, 17 – kamera s CCD senzorem pro záznam dat, 18 – PC pro zpracování dat, 19 – difuzor, 20 – výtlačné potrubí, 21 – měřicí clona, 22 – redukční ventil pomocného ejektoru, 23 – pomocný (sací) ejektor, 24 – škrcení (ovládání protitlaku), 25 – lože experimentální tratě. [4]

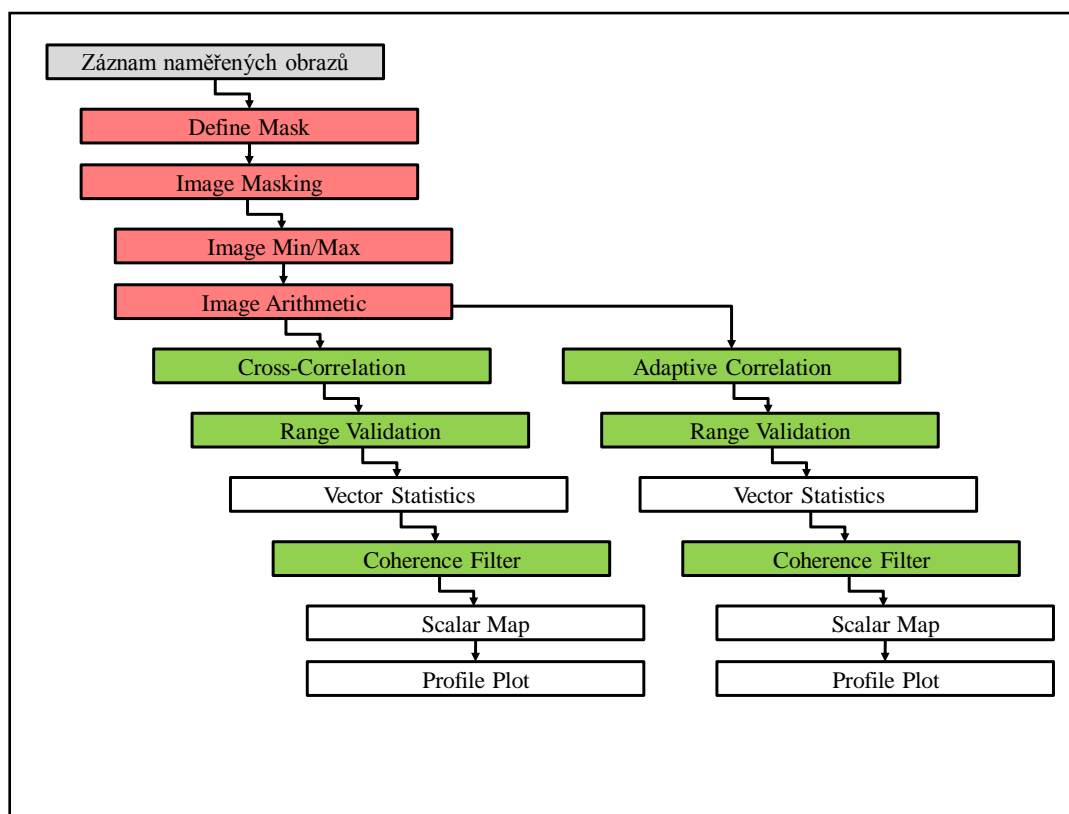
Na obr. 19 jsou vyfotografovány různé druhy trysek. Každá tryska má jiný tvar, který ovlivňuje průběh proudění ve směšovací komoře ejektoru. V případě měření dat pro tuto práci byly použity trysky kruhové s různými průměry.



*Obr. 19: Fotografie porovnávaných tvarů trysek, zleva: čtyřnásobná, křížová, lalokovitá s 8 laloky, lalokovitá s 12 laloky, tryska s generátory podélných vírů a kruhová tryska. [4]*

## 6. Postup zpracování naměřených dat

Po naměření dat, udávajících rychlost proudění v ejektorové komoře, bylo potřeba data zpracovat pomocí programu Dynamic Studio od firmy Dantec. Na obr. 20 je znázorněn použitý postup zpracování dat pomocí metod, které tento program nabízí. Cílem této práce bylo získat vektorové, skalární mapy proudění a rychlostní profily potřebné k vyhodnocení.



Obr. 20: Grafické znázornění postupu zpracování naměřených dat

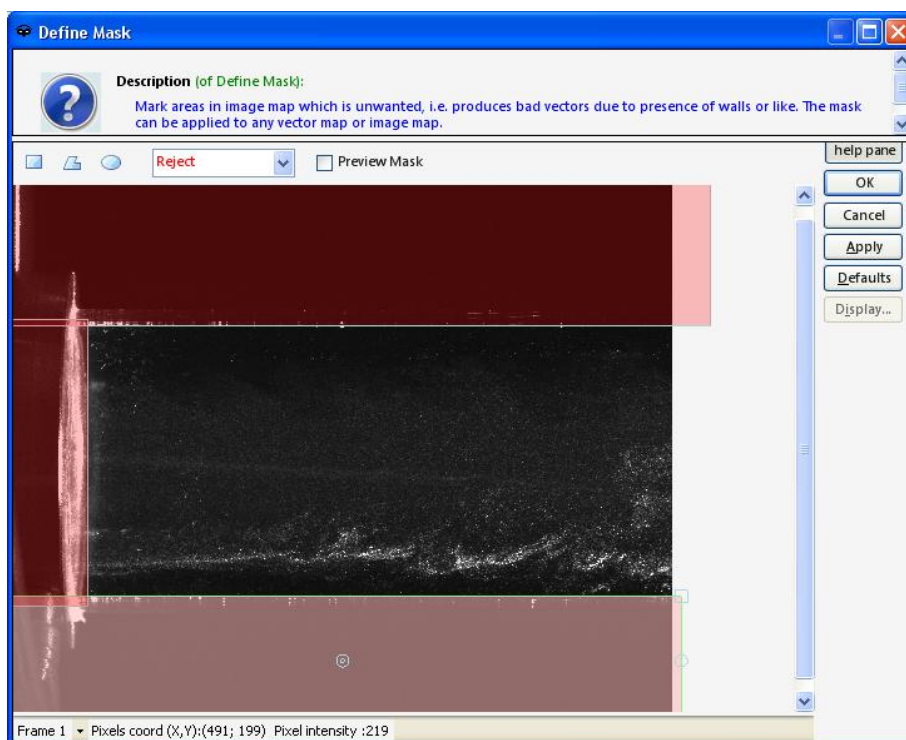
### 6.1 Zpracování obrazového záznamu

Naměřená PIV data v podobě nasnímaných obrazů kamerou pro každou pozici příslušného režimu proudění bylo nejprve nutné předzpracovat pro další zpracování pomocí korelací, validací. Předzpracování spočívalo v následujících funkcích Define Mask, Image Masking a Image Min.

#### Define Mask

Touto metodou byla definována maska pro naměřené obrazy (data), ve kterých se vyskytovaly oblasti, které nebyly vhodné k dalšímu zpracování. Jednalo se o okolí ejektoru, stěny ejektoru obsahující odlesky světla nebo počátek a konec konstrukce ejektorové trubice. V těchto nevhodných oblastech by totiž docházelo k výpočtovým

chybám při dalším zpracování dat. Maska může mít tvar obdélníku, mnohoúhelníku či elipsy.



*Obr. 21: Aplikace metody Define Mask v programu Dynamic Studio  
u počátku směšovací komory ejektoru*

## Image Masking

Metoda maskování byla použita poté, co se definovala maska pro naměřená data (Define Mask). Bylo tak zajištěno oříznutí či vyříznutí definované oblasti maskou a získaly se tím obrazy (data) bez nevhodných oblastí. Oříznuté okolí mělo pak barvu zvolenou před maskováním.

Metody **Image Min/Max** a **Image Arithmetic** byly vybrány k potlačení stálého pozadí, čímž došlo k odstranění většiny odlesků uvnitř ejektoru nebo odlesků od stěn ejektoru.

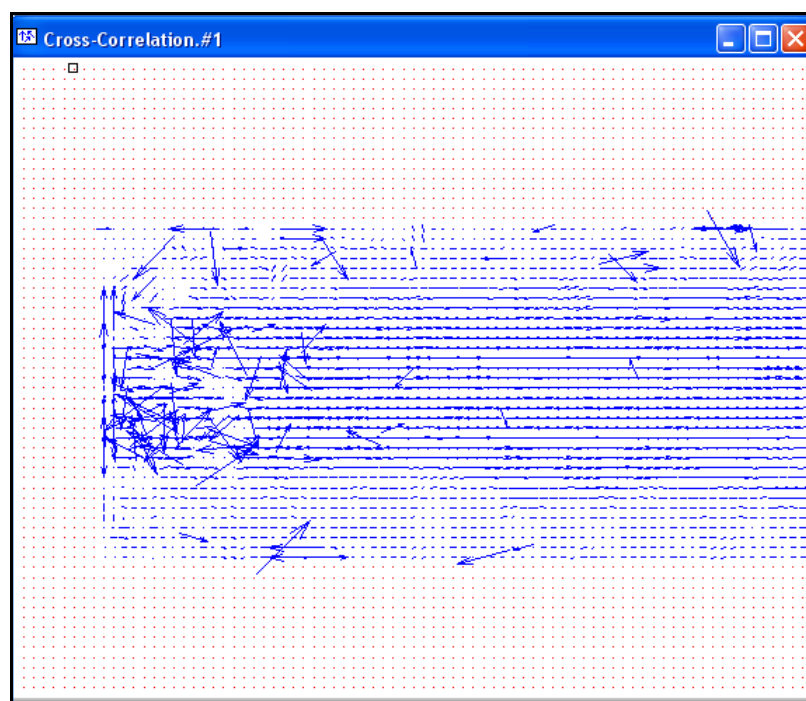
Metodou **Image Min** se zjistil stálý minimální jas každého pixelu při zaznamenávání jedné pozice. Získal se tak jeden obraz obsahující nejmenší hodnoty jasů, které se při metodě **Image Arithmetic** odečetly od jasů pixelů všech původních snímků v dané pozici. Tím bylo docíleno odfiltrování většiny stálých nežádoucích odlesků.

## 6.2 Výpočtové metody

Po upravení obrazového záznamu bylo potřeba získat vektorové mapy. K tomu slouží následující výpočtové metody.

### Korelační metody

Pomocí korelačních metod se získávají vektorové mapy obsahující vektory udávající směr a rychlost proudění v ejektoru. Po aplikování korelačních metod však byly některé vektory určeny chybně, jak může být patrné na obr. 22, jelikož obrazy mohly obsahovat zbylé odlesky nebo zamlžené části a ulpění oleje na povrchu vnitřních stěn ejektoru, ke kterému došlo při samotném měření.



Obr. 22: Ukázka metody Cross-Correlation včetně chybných vektorů  
v programu Dynamic Studio

### Cross-Correlation

Metoda Cross-Correlation je typ vzájemné korelace (viz [4.2.1 Korelační funkce](#)), která nepoužívá offset (viz [4.5.4 Posunutí druhého obrazu](#)). Vyhodnocované oblasti tak byly ve všech vyhodnocovaných obrazech umístěny stejně, neměnila se jejich pozice při výpočtu vektorů. Velikost vyhodnocovaných oblastí byla zvolena (32x32) pixelů a překrývání bylo nastaveno na 50 % v horizontálním i vertikálním směru.

## Adaptive Correlation

Adaptivní korelace využívá tzv. adaptivního offsetu (viz [4.5.5 Adaptivní korelace](#)). Je to metoda, díky níž byl spočítán vektor průměrného posunutí částic ve vyhodnocované oblasti jednoho obrazu. Na základě tohoto vektoru, který se použil jako offset, byly v dalším obraze vypočítány vektory v oblasti posunuté o tento offset.

Adaptivní korelace byla v tomto případě použita pro porovnání s cross korelací. Jelikož bylo při měření cílem dodržet maximální posunutí částic pod  $\pm 1/4$  délky strany vyhodnocované oblasti, nemusela by být použita. Nastavení velikosti vyhodnocovaných oblastí a překrývání bylo zvoleno stejně jako u metody Cross-Correlation.

## Range Validation

Na vektorové mapy, jež vznikly po korelačních funkcích a obsahovaly nevhodné vektory neodpovídajících velikostí a směrů, musela být použita funkce Range Validation. Metoda je podrobněji popsána v kapitole [4.4.1 Range validate](#). Byly experimentálně použity všechny tři filtrační parametry tak, aby bylo dosaženo co nejlepších výsledků filtrování.

## Coherence Filter

Jedná se o další prostorový filtr, který byl aplikován na vektorové pole, aby nahradil rychlosti vektorů, pokud byly v rozporu s rychlostmi dominantních okolních vektorů zvoleného okolí. Rádus porovnávaného okolí byl nastaven na 30 pixelů.

## 6.3 Statistické zpracování výsledků

Následující funkce byly použity pro získání finálních výsledků potřebných k vyhodnocení proudění v vektorové komoře. Výsledky poskytují různé statistické údaje či názorně zobrazují průběhy proudění. Jedná se o metody Vector Statistics, Scalar Map a Profile Plot.

### Vector Statistics

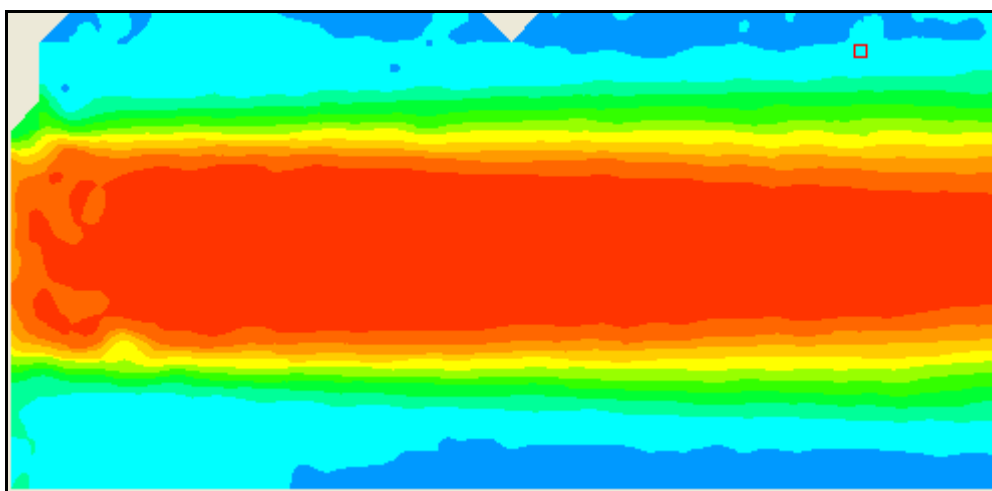
Použitím funkce Vector Statistics byla vždy získána jedna vektorová mapa pro konkrétní pozici. Tato jedna mapa obsahovala průměrné hodnoty vektorů rychlosti původních vektorových map. Výsledkem této statistiky byly zjištěny i další spočítané údaje jako střední rychlosti proudění, směrodatné odchylky, počet vektorů.

Směrodatné odchylky jsou tvořeny nejistotami typu A a B. Přičemž nejistota typu B je tvořena samotným měřením metodou PIV. Z praxe je známo, že chyba měření je

v jednotkách procent. Vliv na tuto nejistotu B má např. sycení, minimální rozlišení matice pixelů. Nejistotu typu A vytváří vliv okolí, v tomto případě turbulentní proudění, a zahrnuje zbytek celkové směrodatné odchylky.

### Scalar Map

Pro vytvoření skalárních map z vektorových map byla aplikována funkce Scalar Map. Výsledné barevné odstíny odpovídají různým rychlostem proudění v ejektorové komoře. Při zpracování dat bylo použito výpočtu délky vektorů z horizontálních a vertikálních složek vektorů rychlosti.

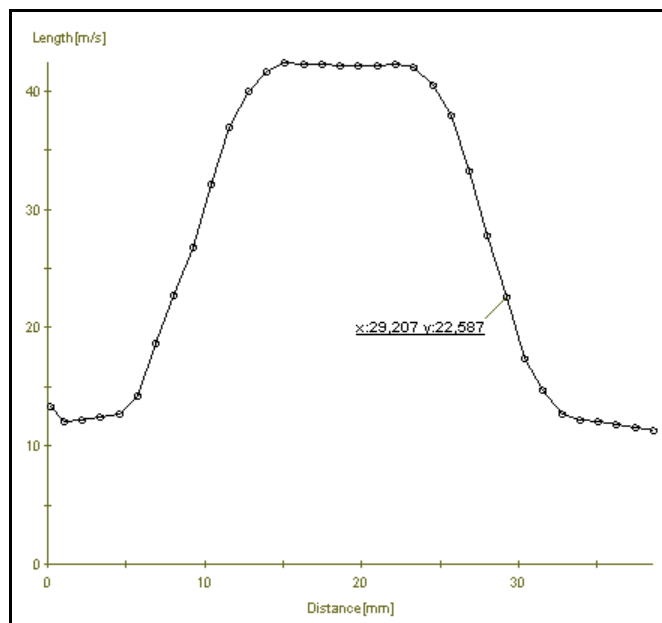


Obr. 23: Zobrazení skalární mapy v programu Dynamic Studio

### Profile Plot

Pomocí funkce Profile Plot bylo možné z vektorových map vytvořit rychlostní profily proudění pro dané měřicí pozice. V tomto případě je vytvořen rychlostní profil také z délek vektorů rychlosti vyskytujících se ve vektorových mapách. Na vodorovné ose je vynesena vzdálenost (šířka ejektoru) a na svislé ose rychlost proudění.

Po získání všech rychlostních profilů v programu Dynamic Studio byla data (vzdálenosti a k nim odpovídající rychlosti proudění) překopírována do prostředí Microsoft Excel a zde nově vytvořeny grafy rychlostních profilů. Grafy jsou vytvořené pouze pro metodu cross korelace, a to vždy tak, že do každého grafu jsou zaneseny průběhy všech čtyř pozic měření pro daný režim proudění. Všechny vytvořené grafy se nachází na příloženém CD-ROM v souboru Rychlostni\_profily.xls.



Obr. 24: Výsledek funkce Profile Plot - rychlostní profil pro konkrétní pozici měření

*Length – rychlost v m/s, Distance – vzdálenost v mm*

## 6.4 Spojení vektorových map

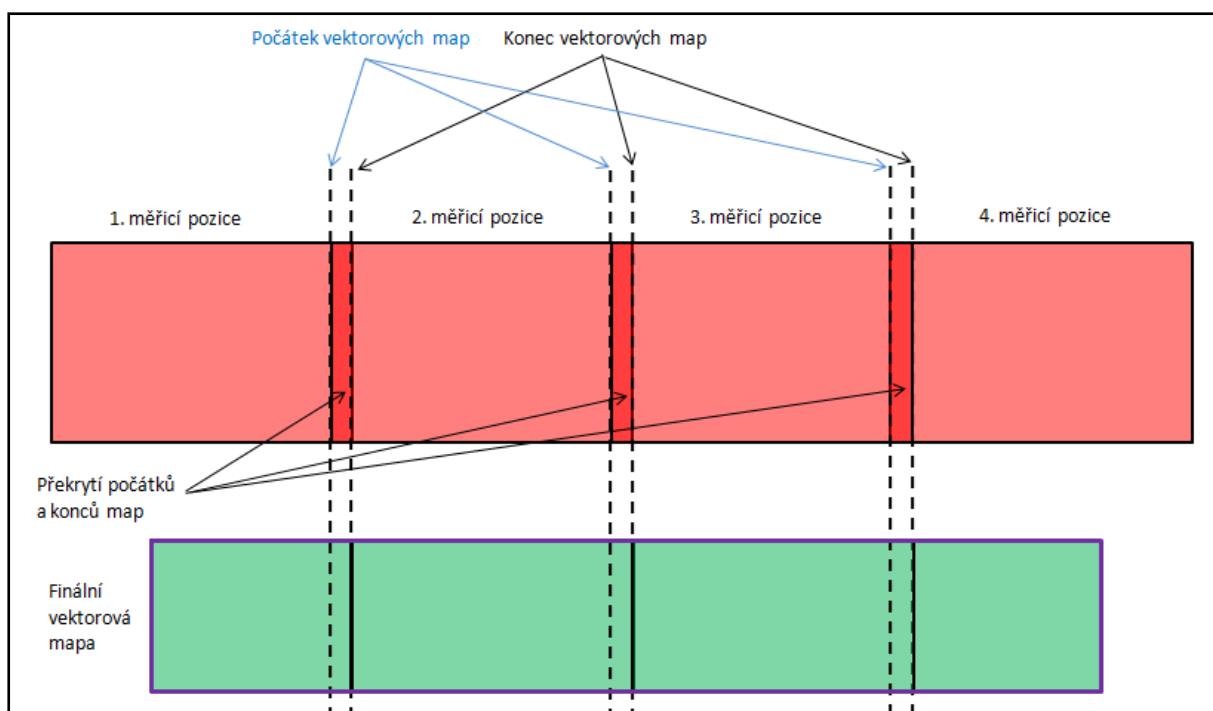
Metodou Coherence Filter byly získány konečné vektorové mapy z jednotlivých měřicích pozic. Aby bylo možné vyhodnotit proudění v celé ejektorové komoře z jedné vektorové mapy a ne vždy ze čtyř samostatných, bylo potřeba tyto čtyři mapy pro každý režim proudění dané trysky spojit. Spojení bylo realizováno pomocí napsaného skriptu v programu MATLAB. Skript se nachází v [příloze A](#).

V Dynamic Studiu bylo vždy nejprve potřeba vybrat příslušné čtyři mapy pro spojení, pomocí funkce MatlabLink načíst MATLAB skript a ten spustit. Před vykonáváním skriptu se na začátku nejprve načítají data ze všech čtyř map do lokálních proměnných ve spuštěném MATLABu. Data obsahují informace o jednotlivých složkách vektorů rychlosti, rozměrech jednotlivých map a další údaje o proudění. Po načtení dat do MATLABu je vykonán samotný skript. Je provedeno spojení těchto čtyř matic (map). Jelikož při měření docházelo k překrývání okrajů měřených oblastí, jež je na obr. 25 znázorněno tmavšími odstíny červené barvy, je ve skriptu provedeno ořezání stejných okrajů jednotlivých pozic tak, aby na sebe vektorové mapy správně navazovaly. Dále je provedeno ořezání nulových či špatných vektorů, aby výsledná mapa obsahovala informace pouze o proudění a nikoliv o okolí ejektoru. Výsledné ořezání a správné spojení je na obr. 25 zobrazeno zelenou barvou. Už nedochází k překrývání a vektorové mapy obsahují pouze informace o proudění v ejektoru.



Takto bylo realizováno spojení map pro všechny režimy proudění, přičemž pro každou trysku bylo provedeno odlišné ořezání. Po každém spojení se konečná data nahrála zpět do Dynamic Studia a byla vytvořena pouze jedna vektorová mapa. Ta je na obrázku znázorněna fialovým okrajem.

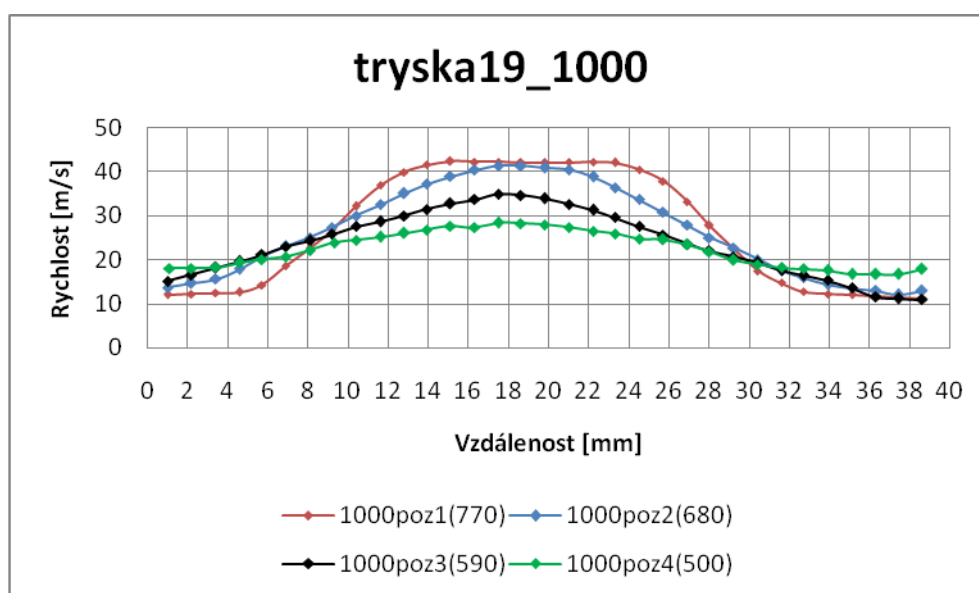
Na přiloženém CD-ROM, ve složce s názvem Vektorove\_mapy, se nachází vytvořené spojené vektorové mapy pro všechny režimy proudění.



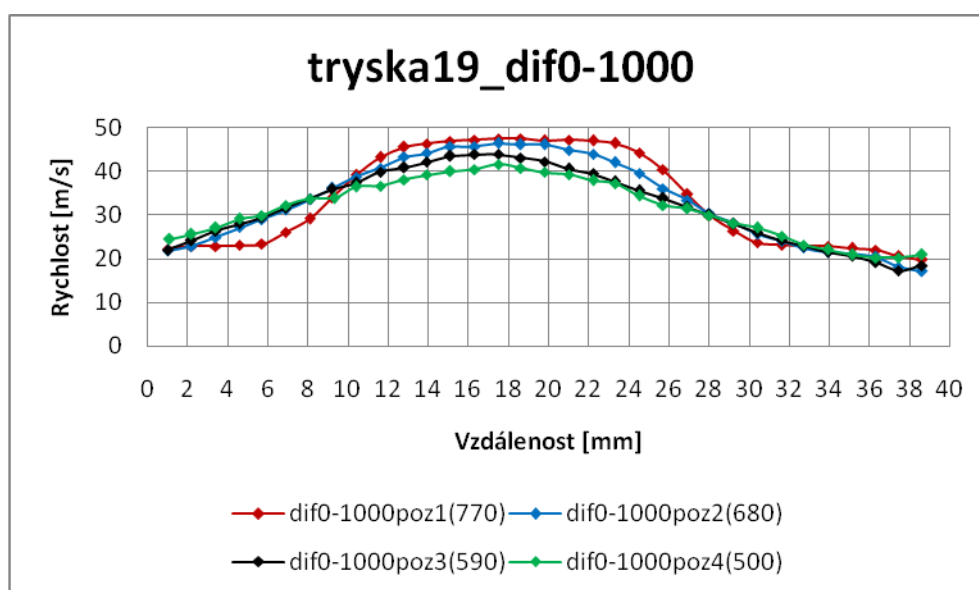
*Obr. 25: Znázornění principu ořezání a spojení vektorových map*

## 7. Vyhodnocení dat

Ze zpracovaných výsledků programem Dynamic Studio, vytvoření rychlostních profilů s užitím Microsoft Excel a spojení vektorových map pomocí MATLAB skriptu byly vybrány určité grafy pro názorné porovnání odlišností v proudění pro různé trysky a jejich režimy proudění. Nakonec byly do práce vloženy pro porovnání vybrané spojené vektorové mapy s barevným odlišením velikostí rychlostí. Čísla trysek označují jejich průměr ústí. Zkratka režimu *dif* značí použití difuzoru, u ostatních režimů difuzor použit nebyl. Číselné hodnoty za zkratkami režimů udávají přetlak hnacího proudu v jednotkách pascalu.

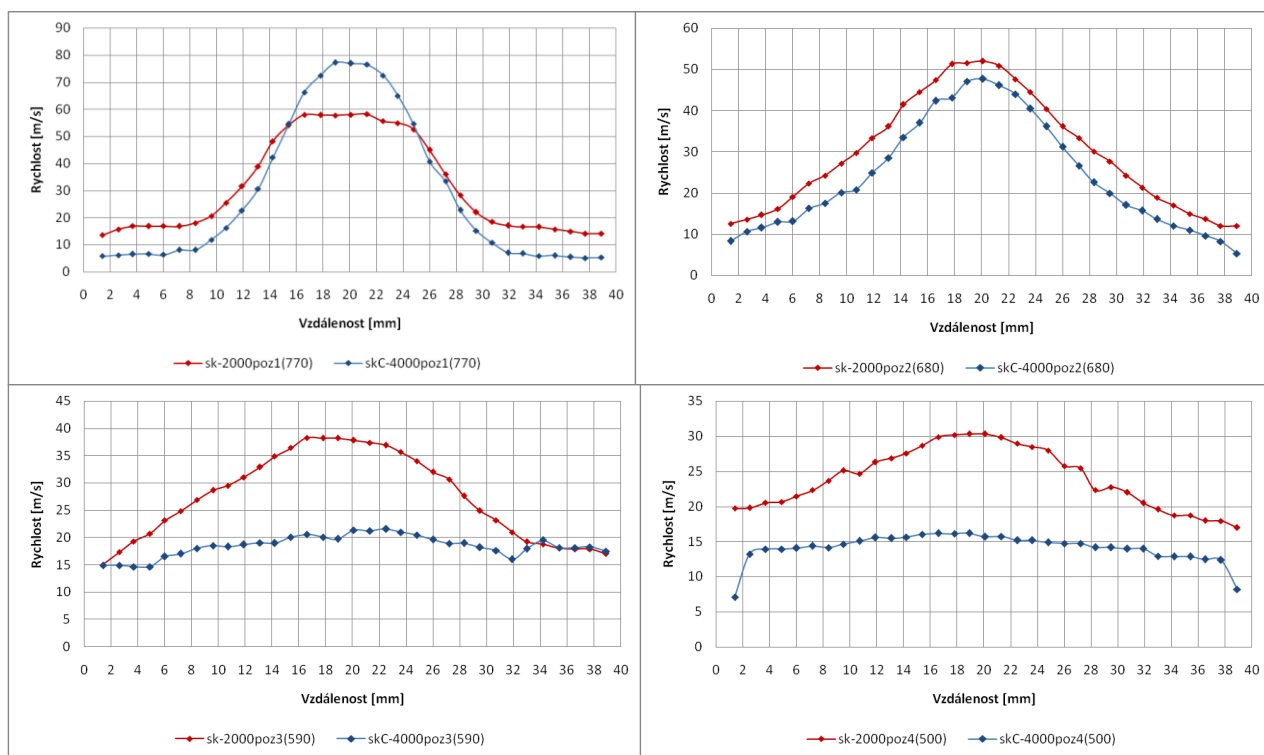


Obr. 26: Rychlostní profily pro trysku19 – režim 1000



Obr. 27: Rychlostní profily pro trysku19 - režim dif0-1000

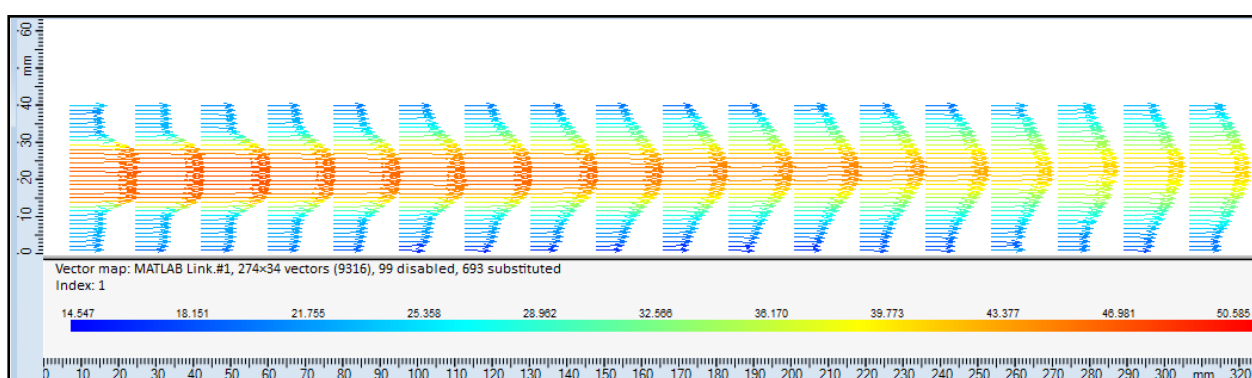
Předchozí dva grafy zobrazují profily proudění pro jednu trysku, ale s odlišným režimem. Na vodorovných osách je vynesena šířka ejektoru v milimetrech a na svislých osách velikost rychlosti v metrech za sekundu. Je patrné, že při režimu *1000* rychlosti proudění postupně, směrem od počátku směšovací komory ke konci, klesají. Oproti tomu při režimu *dif0-1000* se rychlosti proudění udržují téměř stejné po celé délce směšovací komory. To je dáno použitým difuzorem u tohoto režimu, který zapříčinil sjednocení a téměř stejný tvar profilů proudu v celém ejektoru. V obou dvou případech je ale zřejmé, že u první pozice jsou rychlostní profily užší. To je způsobeno vyšším tlakem a rychlostmi proudění hned za tryskou, kde přisávané okolí u stěn nemá ještě takovou rychlost. U dalších pozic se postupně rychlosti u stěn trubice zvyšují a profil se rozšiřuje.



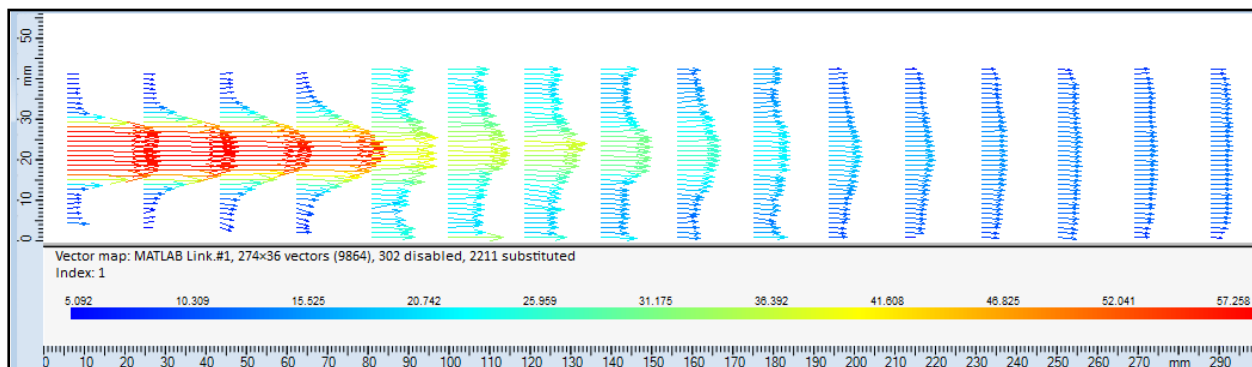
Obr. 28: Porovnání rychlostních profilů trysky15 – režim *sk-2000*  
a trysky10 – režim *skC-4000*

Na horním obrázku jsou zobrazeny rychlostní profily dvou odlišných režimů dvou různých trysek. V levém horním grafu obr. 28 jsou zobrazeny profily z prvních měřicích pozic. Je vidět, že i když se jedná o jinou trysku, tak jsou rychlosti největší při středu a u okrajů jsou naopak nízké vlivem počátečního nasávání. Tím vzniká užší profil proudění. Záleží pak na daném režimu a tryškách, jak velké budou rychlosti. V horním pravém grafu jsou profily z druhé pozice. Rychlosti jsou odlišné, ale tvar

profilových křivek je podobný. V levém dolním grafu se vše podstatně změnilo. Jedná se o třetí měřicí pozici. Pro režim *sk2000* příslušné trysky se sice rychlosti snížily, ale tvar profilové křivky zůstává podobný s předchozí pozicí. Pro režim *skC-4000* se ovšem podstatně snížily rychlosti u středu. Už nedosahují takových velikostí jako v předešlé pozici a jsou vyrovnané v celé šíři trubice ejektoru. V pravém dolním grafu je zobrazena poslední čtvrtá pozice. Graf vykresluje profilové křivky blízké s průběhy třetí pozice, pouze s nižšími rychlostmi. Okrajové hodnoty u režimu *skC-4000*, které prudce klesají, nelze považovat za správné. Mohou být způsobeny chybným zpracováním dat a také špatným měřením u stěn ejektoru.



Obr. 29: Spojené vektorové mapy - tryska19, režim dif0-1000



Obr. 30: Spojené vektorové mapy - tryska15, režim skC-2000

Vektorové mapy zobrazené výše byly vybrány pro zjevný rozdíl průběhů proudění v celé ejektorové komoře. Byly vždy vytvořeny spojením čtyř vektorových map jednotlivých měřicích pozic pro každý režim proudění. Znázorňují vektory rychlosti s různými odstíny barev. Tyto barvy představují velikosti rychlostí. Jelikož pro každou mapu může stejná barva vyjadřovat jinou rychlost, jsou pod průběhy proudění vykreslovány stupnice pro odečtení rychlosti. Rozměry směřovací komory udává měřítko v milimetrech na svislé a vodorovné ose.

Na obr. 29 má proudění po celé délce směšovací komory téměř stejný profil proudu. Byla použita tryska s průměrem 19 mm, což má za následek širší počáteční profil a menší rychlosti oproti proudu na obr. 30, kde byla použita tryska s průměrem 15 mm a proud má zcela odlišný průběh. Rychlosti za tryskou dosahují při středu větších rychlostí, je vytvářen užší počáteční profil proudu a u stěn se blíží rychlosti k nule. Postupně ale rychlosti u středu klesají a naopak u stěn se začínají zvětšovat vlivem strhávání okolí u stěn. Na konci už je profil proudu v jedné rovině a rychlosti jsou stejné.

## Závěr

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo navrhnout postup pro zpracování a zpracovat obrazová PIV data ejektorového proudění, která byla naměřena na experimentální aerodynamické trati v Laboratoři laserové anemometrie na TUL týmem pracovníků z FM a KEZ na FS. Z dosažených výsledků bylo úkolem vyhodnotit chování proudění v ejektorové komoře při použití různých typů trysek a režimů proudění.

Jelikož bylo měřeno ejektorové proudění, bylo nejprve vhodné nastudovat a sepsat rešerši o principu činnosti ejektorů, jejich výhodách, ale i nevýhodách a využití ejektorů v praxi. Dále bylo sepsáno porovnání čtyř možných metod pro měření proudění v ejektorové komoře. Byly uvedeny kontaktní i bezkontaktní metody, jejich výhody a nevýhody. Metoda PIV se jeví jako nejlepší volba pro měření proudění, zejména díky své přesnosti měření, možnosti měřit celý profil proudícího média, a to vše bezkontaktně. V poslední teoretické části byla vypsána podrobnější rešerše právě o PIV metodě, jakým způsobem se měří a analyzují obrazy PIV a jaké chyby a omezení s sebou tato metoda přináší.

V praktické části této práce byly nejprve navrženy tři experimentální uspořádání řešící nastavení pozic ejektoru, kamery a laseru pro měření proudění v uzavřené ejektorové komoře metodou PIV. Záleželo pak na technických možnostech a vybavení, které uspořádání lze použít. Pro měření dat pro tuto práci byla vybrána možnost pohyblivého ejektoru a statické polohy kamery s laserem.

Hlavní náplní této práce bylo zpracování naměřených obrazových PIV dat programem Dynamic Studio. Data byla v tomto programu nejdříve před samotnou analýzou předzpracována, což spočívalo v odstranění nepoužitelných částí PIV obrazů a odstranění trvalých nežádoucích odlesků vyskytujících se zejména u stěn ejektoru. Poté byl navržen postup použití dalších metod pro analýzu dat. Ten byl pak aplikován, čímž byly postupně získány výsledky v podobě vektorových, skalárních map proudění nebo rychlostních profilů pro jednotlivé měřicí pozice příslušných režimů proudění. K proměření proudění po celé délce směšovací komory ejektoru byly snímány čtyři pozice v rámci jednoho režimu proudění. Proto byl napsán skript v programu MATLAB pro doplňující analýzu, která spočívala zejména ve správném spojení jednotlivých vektorových map z těchto čtyř pozic. Takto byly získány přehledné vektorové mapy obsahující vždy všechny čtyři měřené pozice v rámci jednoho režimu, což bylo vhodné

ke konečnému vyhodnocení. Grafy rychlostních profilů byly vytvořeny pro jednotlivé pozice pomocí programu Dynamic Studio. V programu Microsoft Excel byly tyto grafy vytvořeny znovu tak, aby v jednom grafu bylo možné porovnat vždy profily ze všech čtyř pozic daného režimu proudění.

K vyhodnocení výsledků lze konstatovat, že proudění ejektorem je ovlivňováno výběrem trysky pro hnací médium, ale také aplikovaným režimem proudění. Jak bylo možné zjistit z dosažených výsledků, při použití difuzoru se rychlosti a tvar profilů proudění udržují téměř stejné po celé délce směšovací komory, případně pokles rychlostí je menší než bez použití difuzoru. Bez difuzoru rychlosti proudění klesají mnohem dříve a profil proudu se tak neudrží stejný po celé délce směšovací komory.

Z výsledků pro kruhové trysky lze dále usoudit, že profily proudění jsou zpočátku užší vlivem vysokých počátečních rychlostí a vysokého tlaku hnacího média. Šířka profilu na začátku proudění je také dána průměrem trysky. S větší vzdáleností od ústí hnací trysky se rychlosti uprostřed ejektoru zmenšují a naopak u okrajů zvětšují, tím dochází k rozšiřování a vyrovnávání profilů. To je dáno postupným strháváním okolí u stěn.

Pro budoucí experimenty lze doporučit častější čištění stěn ejektoru od olejových sytících částic během měření, aby nedocházelo ke zkreslení obrazových dat. Zároveň je potřeba volit vhodnou hustotu těchto částic pro správné a přesné určení vektorů rychlosti. Dále je nutné při posunování ejektoru dodržovat co nejpřesněji měřicí pozice, aby na sebe obrazy navazovaly.

Výstupy této práce lze použít pro další návrh či úpravu trysek – jejich velikostí a tvarů. Výsledky práce mohou sloužit pro verifikaci numerických modelů – pro nastavení různých parametrů a podmínek, které se získaly z těchto experimentálních dat, a jenž se pak zadávají do numerických modelů.

## Seznam použité literatury

- [1] Armfield. *H30 Pitot Tubes* [online]. 2006 [cit. 15.3.2012]. Dostupné z: [www.discoverarmfield.co.uk/data/h30/](http://www.discoverarmfield.co.uk/data/h30/)
- [2] BÍLEK, Martin. *Modelování proudění v ejektoru*. Brno, 2009. 70 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Energetický ústav. Vedoucí práce Jaroslav ŠTIGLER.
- [3] DANTEC DYNAMICS. *FlowMap Particle Image Velocimetry Instrumentation*. Denmark, Tonsbaken, 2000.
- [4] DVOŘÁK, Václav. *Výzkum a optimalizace proudění v ejektorech*. Liberec, 2010. 130 s. Habilitační práce. Technická univerzita v Liberci. Strojní fakulta. Katedra energetických zařízení.
- [5] KEANE, R.D., ADRIAN, R.J.. *Optimization of particle image velocimeters. Part I: Double-pulsed systems*. Measurement Science and Technology 1, p. 1202-1215, 1990.
- [6] KEANE, R.D., ADRIAN, R.J.. *Theory of cross-correlation analysis of PIV images*. Applied Scientific Research 49, p. 191-215, 1992.
- [7] KOLÍNSKÝ, Jan. *Vyhodnocení 2D rychlostního pole metodou PIV programem Matlab* [online]. 2007 [cit. 13.3.2012]. Dostupné z: [trubka.fs.cvut.cz/downloads/FRVS07/Manual\\_2DPIV\\_matlab.pdf](http://trubka.fs.cvut.cz/downloads/FRVS07/Manual_2DPIV_matlab.pdf)
- [8] KOPECKÝ, Václav. *Laserová anemometrie v mechanice tekutin*. Brno: Tribun EU, 2008. 205 s. Knihovnicka.cz. ISBN 978-80-7399-357-3.
- [9] KOPECKÝ, Václav. *Limits and Biases of Particle Image Velocimetry*. In: 5th Workshop on Electronics, Control, Modelling, Measurement and Signals. Toulouse 2001, s. 141-147, Université Paul Sabatier Toulouse.



- [10] OTTE, Lukáš. *Technické prostředky automatizace: Základní měření v důlním prostředí vzhledem k bezpečnosti, přenosové systémy dat v dole a automatická identifikace objektů* [online]. 2007 [cit. 9.3.2012].  
Dostupné z: [homel.vsb.cz/~ott007/TPA-Otte.htm#\\_Toc153970100](http://homel.vsb.cz/~ott007/TPA-Otte.htm#_Toc153970100)
- [11] SCHAUER, Pavel. *Hydrodynamika* [online]. 2012 [cit. 2.2.2012].  
Dostupné z: [fyzika.fce.vutbr.cz/doc/vyuka\\_schauer/hydrodynamika.pdf](http://fyzika.fce.vutbr.cz/doc/vyuka_schauer/hydrodynamika.pdf)
- [12] URUBA, Václav. *Anemometrie - žhavené senzory* [online]. [cit. 2.2.2012].  
Dostupné z: [www.it.cas.cz/~uruba/docs/ZIE/HW.pdf](http://www.it.cas.cz/~uruba/docs/ZIE/HW.pdf)
- [13] URUBA, Václav. *Laser Dopler Anemometry (LDA)* [online]. [cit. 15.3.2012].  
Dostupné z: [www.it.cas.cz/~uruba/docs/ZIE/LDA.pdf](http://www.it.cas.cz/~uruba/docs/ZIE/LDA.pdf)
- [14] ZUBÍK, Pavel. *Princip LDA* [online]. [cit. 9.3.2012]. Dostupné z: [www.fce.vutbr.cz/VST/zubik.p/zkladn1.htm](http://www.fce.vutbr.cz/VST/zubik.p/zkladn1.htm)

# Příloha A

## MATLAB skript pro spojení výsledných vektorových map

```
global Output;
Output=Input{1,1};

% Tryska19
UU = [Input{1,1}.dataset.U(14:47,8:79)
Input{1,2}.dataset.U(14:47,3:79) Input{1,3}.dataset.U(14:47,3:79)
Input{1,4}.dataset.U(14:47,3:50)];
VV = [Input{1,1}.dataset.V(14:47,8:79)
Input{1,2}.dataset.V(14:47,3:79) Input{1,3}.dataset.V(14:47,3:79)
Input{1,4}.dataset.V(14:47,3:50)];
SStatus = [Input{1,1}.dataset.Status(14:47,8:79)
Input{1,2}.dataset.Status(14:47,3:79)
Input{1,3}.dataset.Status(14:47,3:79)
Input{1,4}.dataset.Status(14:47,3:50)];

% Tryska15
UU = [Input{1,1}.dataset.U(13:48,12:79)
Input{1,2}.dataset.U(13:48,3:79) Input{1,3}.dataset.U(13:48,3:79)
Input{1,4}.dataset.U(13:48,3:54)];
VV = [Input{1,1}.dataset.V(13:48,12:79)
Input{1,2}.dataset.V(13:48,3:79) Input{1,3}.dataset.V(13:48,3:79)
Input{1,4}.dataset.V(13:48,3:54)];
SStatus = [Input{1,1}.dataset.Status(13:48,12:79)
Input{1,2}.dataset.Status(13:48,3:79)
Input{1,3}.dataset.Status(13:48,3:79)
Input{1,4}.dataset.Status(13:48,3:54)];

% Tryska10
UU = [Input{1,1}.dataset.U(13:48,16:79)
Input{1,2}.dataset.U(13:48,3:79) Input{1,3}.dataset.U(13:48,3:79)
Input{1,4}.dataset.U(13:48,3:57)];
VV = [Input{1,1}.dataset.V(13:48,16:79)
Input{1,2}.dataset.V(13:48,3:79) Input{1,3}.dataset.V(13:48,3:79)
Input{1,4}.dataset.V(13:48,3:57)];
SStatus = [Input{1,1}.dataset.Status(13:48,16:79)
Input{1,2}.dataset.Status(13:48,3:79)
Input{1,3}.dataset.Status(13:48,3:79)
Input{1,4}.dataset.Status(13:48,3:57)];

% DEFINOVANI VELIKOSTI VYSTUP. OBRAZU A PREVOD NA VYSTUP
Output.type='Vector Statistics'
Output.imageSize=[12506,1024];
Output.sensorSize=[12506,1024];
Output.gridSize=[275,34];
%Output=Input;
Output.dataset.U = UU;
Output.dataset.V = VV;
Output.dataset.Status=SStatus;
```